

암질지수(RQD)에 관한 고찰 Review for Rock Quality Designation

정남수¹⁾, Nam-su Jeong

1) (주)지오넥서스, 대표이사

1. RQD의 정의

공학적인 목적으로 암반을 분류할 때 암질지수의 개념이 자주 사용되고 있는 암질지수의 개념은 Deere(1966)에 의하여 불연속면의 간격을 정량화할 목적으로 도입되었는데 RQD는 시추시 회수되는 코어로부터 계산된다.

RQD(Rock Quality Designation)는 가장 널리 사용되는 시추코어 회수율인 TCR(Total Core Recovery)를 발전시킨 개념으로 채취된 코어중 길이가 10cm 이상인 코어들의 길이의 합으로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{TCR(Total Core Recovery)} = \frac{\text{회수된 코어의 길이}}{\text{총 시추길이}} \times 100 (\%)$$

$$\text{SCR(Solid Core Recovery)} = \frac{\text{회수된 고체코어의 길이}}{\text{총 시추길이}} \times 100 (\%)$$

$$\text{RQD(Rock Quality Designation)} = \frac{\text{길이 10cm 이상인 고체코어의 길이의 합}}{\text{총 시추길이}} \times 100(\%)$$

· 고체코어(Solid Core)는 균열상태평가에서 정의되어야 할 핵심어로 두 자연적인 균열 사이의 코어축을 따라 측정되는 적어도 하나의 완전한 지름(반드시 완전한 원주일 필요는 없다)을 갖는 코어를 가리킨다.

· TCR > SCR > RQD

확실히 인지되는 균열의 수

$$FI(\text{Fracture Index}) = \frac{\text{비교적 균질한 특성의 코어길이에서 측정되는 intact 코어조각 미터굴진당}}{\text{비교적 균질한 특성의 코어길이에서 측정되는 intact 코어조각 미터굴진당}}$$

FI(Fracture Index)는 반드시 전체코어굴진에 적용될 필요는 없으며, 코어굴진동안 균열의 빈도에 급격한 변화가 있다면 각 진입부분마다 FI를 계산해야 된다.

non-intact(NI)란 말은 코어가 조각나 있을 때 써야하며 비교적 균일한 특성을 갖는 코어에 대해서 회수된 코어조각들의 최대, 평균, 최소 길이를 언급하여 세부사항을 추가할수도 있다.

퇴적암이나 엽상(foliation)조적을 갖는 변성암 등에서는 시추시 발생한 신선한 파쇄면인지 아니면 기존의 불연속면인지의 여부를 구별하기 위해 세심한 주의를 기울여야 한다.

RQD(%)	0 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 90	90 ~ 100
암질지수	매우 우수 (Excellent)	우수 (Good)	양호 (Fair)	불량 (Poor)	매우 불량 (Very Poor)

2. 측정 방법

RQD값 산정시 시추구간 길이는 1.5m보다 크지 않게 한다. 외국의 경우는 시추구간 길이 1m마다 측정한다. 암질이 불량하면 코어의 회수율이 낮고 RQD값도 작아지며 시추장비가 노후되고 기능공의 숙련이 미숙하여도 코어의 회수율이 나빠지므로 국제암반역학회(ISRM)에서는 코어의 직경이 적어도 NX크기(54.7 mm)인 diamond 비트, 2중관 시료채취기(Double tube core barrel)의 사용을 권장하고 있으며, RQD 측정시 10cm는 이 코어직경의 약 2배를 의미한다. 암질이 양호할수록 RQD값은 커지며, 심하게 풍화된 암석의 경우는 0의 값을 갖게 된다.

RQD값은 절리의 과다만을 포함하는 지수이므로 합리성이 결여된 단점이 있지만, 하나의 암반평가요소인 암질지수는 이 항목하나만으로도 경암터널의 지보의 설계에 이용될 만큼 적용성이 뛰어나다.

1) 직접법

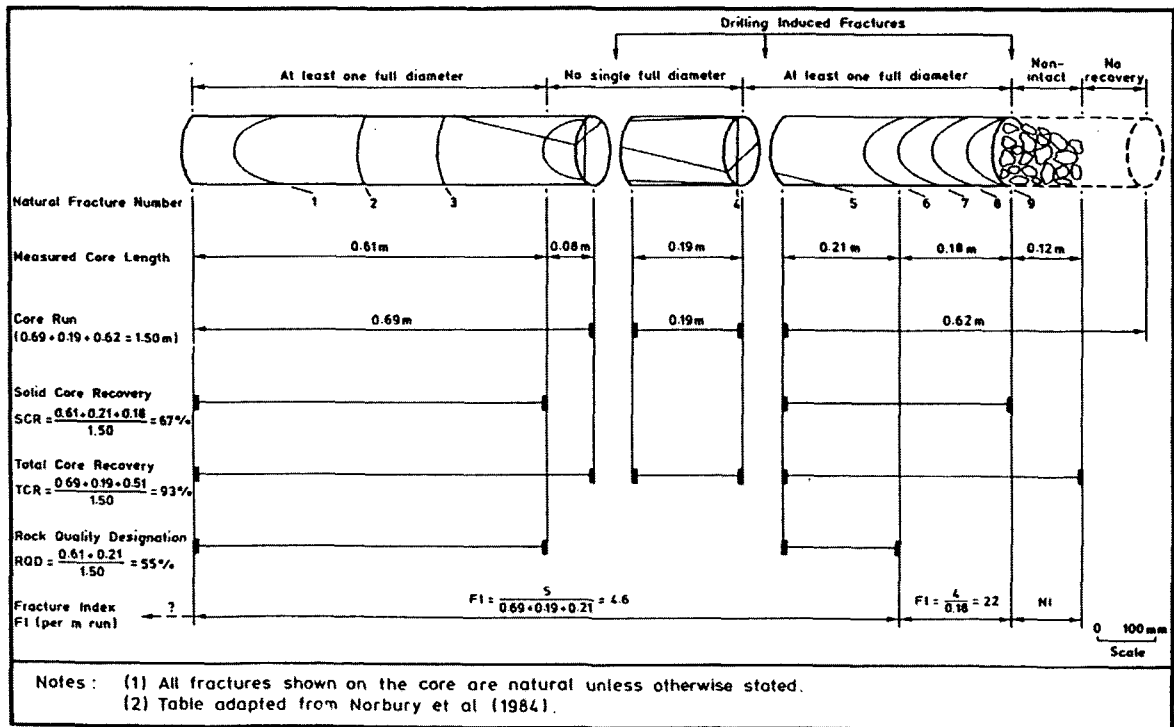


그림 1. 암석코어 Logging의 개략적인 모식도

2) 간접법

i) 탄성파속도

RQD는 절리빈도(discontinuity frequency), 탄성파속도, 전기적 저항과는 좋은 상관성을 보이나 현지 암반의 투수계수(permeability)와는 상관성이 없는 것으로 알려져 있다.

표 1. RQD와 절리빈도(F), 속도지수(I_v), 암반암질계수(j)와의 관계

R Q D (%)	F (per meter)	I_v	j
0 ~ 25	15 이상	0.2 이하	0.2
25 ~ 50	8 ~ 15	0.2 ~ 0.4	0.2
50 ~ 75	5 ~ 8	0.4 ~ 0.6	0.2 ~ 0.5
75 ~ 90	1 ~ 5	0.6 ~ 0.8	0.5 ~ 0.8
90 ~ 100	1 이하	0.8 ~ 1.0	0.8 ~ 1.0

$$RQD(\%) = \text{Velocity ratio} = (V_F/V_L)^2 \cdot 100$$

· 속도지수 : 암반내에 존재하는 절리의 영향은 현장암반내에서의 탄성과속도 V_F 와 암반에서 채취한 암석시편을 가지고 실험실에서 측정된 탄성과속도 V_L 을 비교하여 봄으로써 알 수 있다. 두 속도가 차이나는 것은 현장에 존재하는 절리 때문으로 이 두 속도의 비는 암질과 밀접한 관계가 있으며 암질이 우수한 암반에서는 거의 1에 가깝고 절리와 균열이 증가하면 이 속도비는 감소하게 된다. 이것이 탄성과 속도지수(velocity index)의 원리이며 탄성과속도지수는

$$I_v = \left(\frac{V_F}{V_L}\right)^2 \text{ 로 정의된다(Coon과 Merritt, 1970)}$$

여기서, V_L 은 무결암에 대해 실험실에서 측정된 탄성과속도로 시험편의 길이가 짧아서 초음파를 이용하여 계측하므로 초음파속도(ultra sonic velocity)라고도 한다. 한편 V_F 는 현장 암반에 대해 측정된 탄성과속도로 V_F 가 항상 V_L 보다 작다.

· 암반암질계수 : 현장암반은 무결암과는 달리 큰 규모의 균열이나 열극이 내재되어 있는 경우가 많아서 응력에 대한 변형의 정도가 무결암보다 크다. 이에 착안한 것이 암반암질계수(rock mass factor) j 로 다음과 같이 정의된다.

$$j = \left(\frac{E_F}{E_L}\right)$$

· 절리빈도(fracture frequency) F 는 특히 불연속성 암반의 특성을 직접적으로 반영하는 지수로서 단위길이(1m)당 절리의 수로 정의된다. 절리의 크기나 협재물의 특성을 반영하지는 않지만 암질지수 j 와 F 사이에는 절리빈도가 늘 때 j 는 지수적으로 감소하는 관계가 알려져 있다. 풍화된 균열의 경우 j 는 넓게 분산된 값을 보인다.

ii) 절리빈도수

시추코어나 노두에 나타나는 불연속면의 간격을 측정함으로써 RQD를 계산하는 식은

$$RQD = 100 \cdot e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad (\text{Hudson과 Priest, 1979})$$

그러나 위의 식으로 나타나는 곡선은 절리빈도를 나타내는 $\lambda = 6 \sim 16/m$ 인 경우 측정된 RQD는 선형관계가 있는 것으로 나타나므로 $RQD = -3.68\lambda + 110.4$ 가 된다.

Palmstrom(1982)은 시추가 불가능하여 코어를 얻기가 곤란한 경우에는 체적당 절리의 수로부터 간접적으로 RQD값을 구할 수 있는 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$RQD = 115 - 3.3J_v (\text{대략적인 값}) \quad (J_v < 4.5 \text{이면 } RQD=100)$$

여기서, 체적절리계수(Volumetric joint count, J_v)는 각 절리군에 대해 단위길이 m당 나타나는 절리수의 총합(절리수/m³)으로 정의된다. 관련된 절리군에 수직으로 만나는 기준선을 설정하여 각 절리군에 대한 절리의 수를 센다. 기준선의 길이는 5m 나 10m가 적당하며 결과는 m³당 절리의 수로 표시한다.

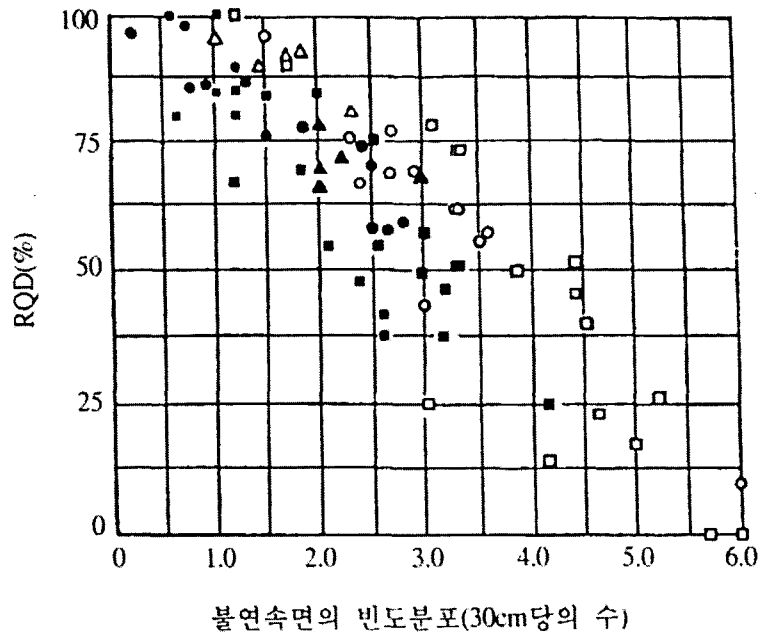


그림 2. RQD와 불연속면 빈도와의 관계 (Deere 외)

3. RQD 산정 및 해석시 주의점

1)코어의 길이를 재는 방법에는 ① tip to tip, ② center line, ③ fully circular의 3가지가 있으며, 일반적으로 center line법을 쓰고 있다.

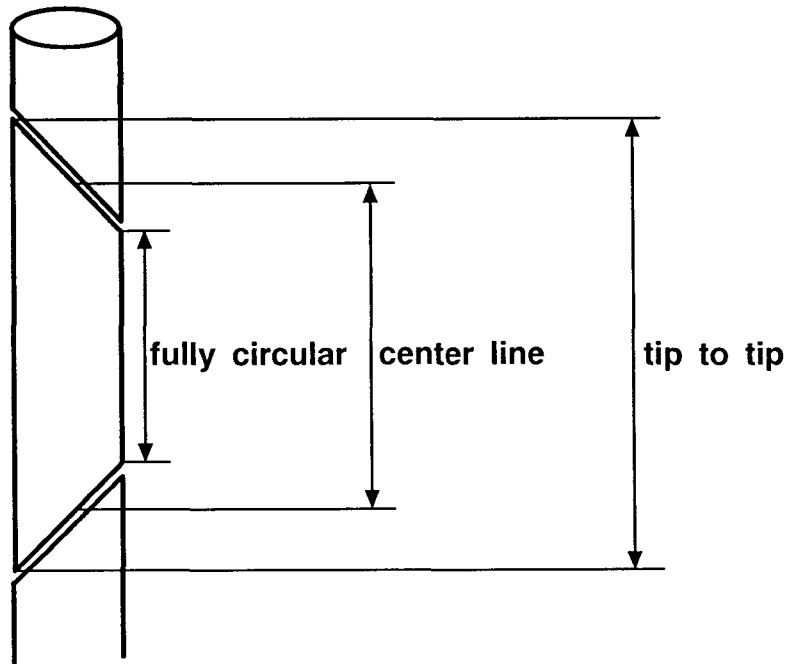
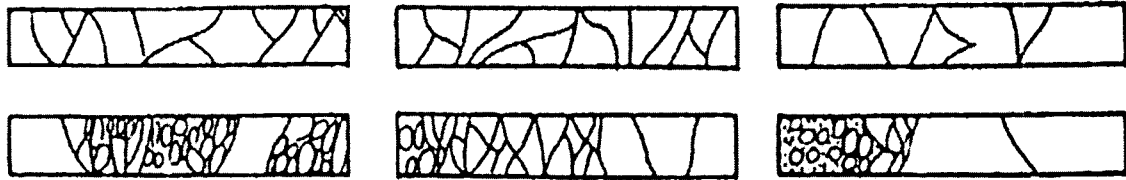


그림 3. 코어 길이 측정방법

2) 코어형상에 따라 암질이 다를 수 있으며, 이는 아래 그림 (a), (b), (c)의 각각의 코어상태를 볼 때 10cm이하의 코어 길이의 합만을 고려하면 아래 그림쪽의 RQD값이 크게 되지만 암반상태는 아래쪽 암반이 더 불량하다. 따라서 주상도상에는 암반의 풍화상태는 물론 절리의 간격, 절리의 형태, 절리면의 거칠기, 절리각도 등을 기재할 필요가 있다.



(a) 하부 코어 RQD=30%
상부암반쪽이 양호

(b) 상부코어 RQD=0%
하부코어 RQD=40%
하부암반이 더 불량

(c) 상하 코어 RQD=60%
하부암반이 더 불량

그림 4. RQD와 암질평가가 일치하지 않는 경우

위의 그림에서 개략적으로 SCR(Solid Core Recovery)을 함께 측정해보면

- (a) 상부코어 SCR=60%, RQD=0%, 하부코어 SCR=30%, RQD=30%
- (b) 상부코어 SCR=50%, RQD=0%, 하부코어 SCR=40%, RQD=40%
- (c) 상부코어 SCR=90%, RQD=60%, 하부코어 SCR=60%, RQD=60%

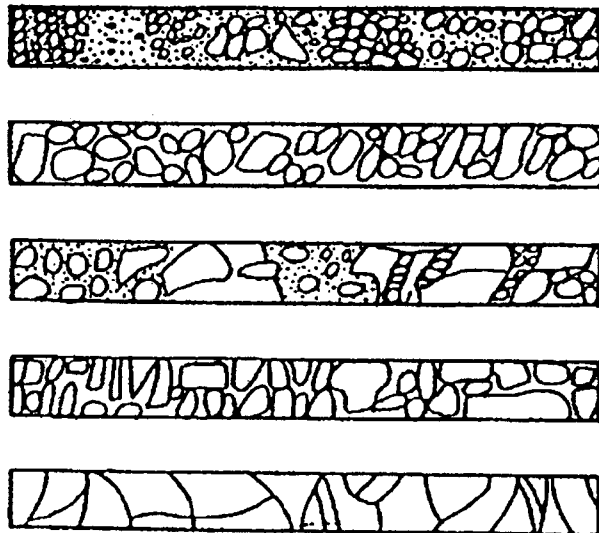


그림 5. RQD 0%의 암반에도 구분이 필요한 예

위의 그림의 경우 모두 RQD=0%의 코어상태를 나타낸 것이지만 RQD=0 이라고 하여도 현실에는 이와 같은 암반차이가 생기게 된다. 그러므로 RQD값과 함께 SCR값을 병기해 놓는 것이 암반상태를 옳게 판단하는데 도움이 된다.

4. 암질지수(RQD)의 응용

1) 암질과의 관계

Cording과 Deere(1972)는 RQD값을 Terzaghi의 암반하중요소(rock load factor)들과 관련시켜 터널지보와 RQD와의 관계를 다음 표와 같이 발표하였으며, 이들은 Terzaghi의 암반하중개념은 철재지보로 지지되는 터널에 한정시켜야 된다고 주장하였는데 이는 이 개념이 록볼트나 슛크리트에 의해 지지되는 터널에 잘 적용되지 않기 때문이다.

R Q D (%)	암 질	Terzaghi 분류
0 ~ 25	매우 불량(Very Poor)	1 ~ 3
25 ~ 50	불 량(Poor)	3 ~ 4
50 ~ 75	보 통(Fair)	5
75 ~ 90	양 호(Good)	5 ~ 6
90 ~ 100	매우 양호(Excellent)	6 ~ 7

2) 암질과 탄성파속도와의 관계

최근에는 현장에서 측정한 탄성파속도와 암질의 상관성을 이용하여 터널의 지보량을 산정하는 방법이 유망한 것으로 보고되고 있다(Barton, 1995). 그러나 현장의 탄성파속도는 터널의 깊이, 암반의 공극률, 함수율, 암반의 강도 등에 영향을 받기 때문에 암질과 상관성을 조사하는 것은 간단하지가 않다. 또한 탄성파굴절법의 경우 탄성파 침투능의 한계로 지하 심부까지 조사하는데 어려움이 있었다. 이러한 제약은 최근의 시추공간 탐사와 지오토폰모그래피 기법의 발달로 어느정도 극복할 수 있게 되었다. 이와같은 기법을 이용하여 회수된 코어의 질(RQD, 절리빈도, Q값 등으로 측정)과 인접 지층의 탄성파속도 토모그램을 직접 비교하는 것이 가능하게 되었고, 시추공간의 암질을 추정할 수 있는 관계식이 제안되었다.

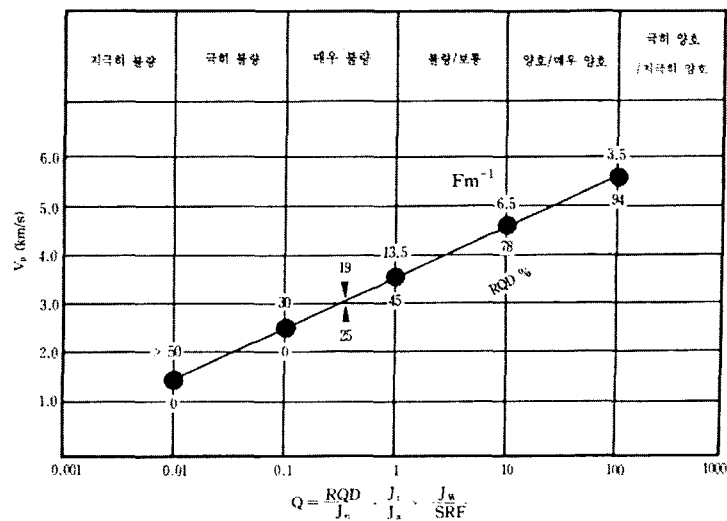


그림 6. 암질과 탄성파 속도사이의 관계

P파속도(V_p , km/s), Q, 절리빈도(F , m^{-1}), RQD(%)사이의 관계를 보여주고 있으며, 그림에서 절리빈도(F), RQD와 V_p 의 상관성은 Sjogren 등(1979)의 연구를 바탕으로 한 것으로 이들은 불투수성 경암을 대상으로 100km 이상의 굴절법 탐사자료와 거의 3km에 이르는 시추코어 분석을 통하여 이러한 상관성을 발견하였다.

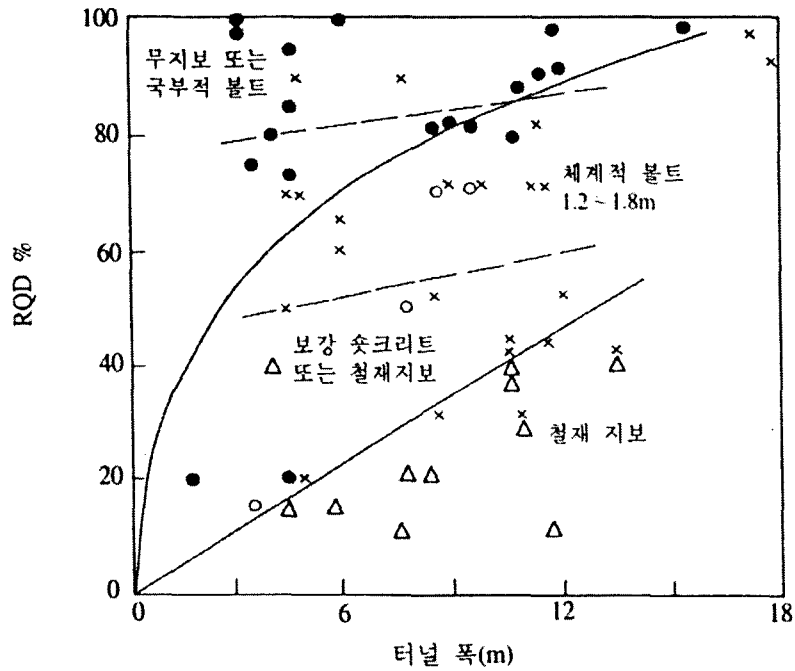
3) RQD 시스템

이 시스템은 Deere 등(1967)이 발표한 코어암질지수를 암반터널의 지보요건을 추정하는데 적용한 것으로(Merritt, 1972) 다른 방법들과는 달리 코어암질지수와 터널의 폭만으로 지보량을 정하게끔 제안한 것이다. 최근의 RQD시스템은 직경 6.1~12.2m의 터널에 대해 터널지보와 보강 시스템의 선택에 대한 가이드라인으로 적용되며 천공발파방식과 기계굴착식 터널 고려하여 지보량을 달리하도록 되어있다. RQD 시스템은 절리암반의 경우 특히 절리의 방향이나 견고성, 충전물 등을 전혀 고려하지 않고 단지 시추공내 절리 간격 자료하나만으로 지보량을 산정하기 때문에 필연적인 한계가 있지만 점토광물이 없는 암체에 대해서 RQD시스템은 잘 적용될 수 있다.

표 2. 6m 폭의 터널에 대한 RQD 지보요건

구 분	무지보 또는 국부볼트	패 턴 볼 트	강 지 보
Deere 등 (1970)	RQD 75~100	RQD 50~75 (1.5~1.8m 간격)	RQD 50~75 (1.5~1.8m 간격, 경량지보나 볼트)
		RQD 25~50 (0.9~1.5m 간격)	RQD 25~50 (0.9~1.5m 간격)
			RQD 0~25 (0.6~0.9m 간격)
Cecil (1970)	RQD 82~100	RQD 52~82 (대안으로 40~60mm 슛크리트)	RQD 0~52 (지보나 보강 슛크리트)
Merritt (1972)	RQD 72~100	RQD 23~72 (1.2~1.8m 간격)	RQD 0~23

- Merritt(1972)로부터 Deere(1988)에 의해 추정된 자료



● 무지보 ○ 국부적인 볼트 △ 체계적인 볼트 × 철재 지보

그림 7. RQD와 터널폭에 의한 지보분류(Merritt, 1972)

4) 변형계수와와의 관계

실험실에서 측정된 결과를 이용하여 현지 암반의 변형계수를 추정하는데 RQD와 변형계수 감소비(E_M/E_L)의 상관관계를 이용(Bieniawski, 1978)하기도 하며, 여기서 E_M 은 현지 암반의 변형계수이며 E_L 은 작은 무결암석 시험편을 대상으로 실험실에서 측정된 변형계수 이다.

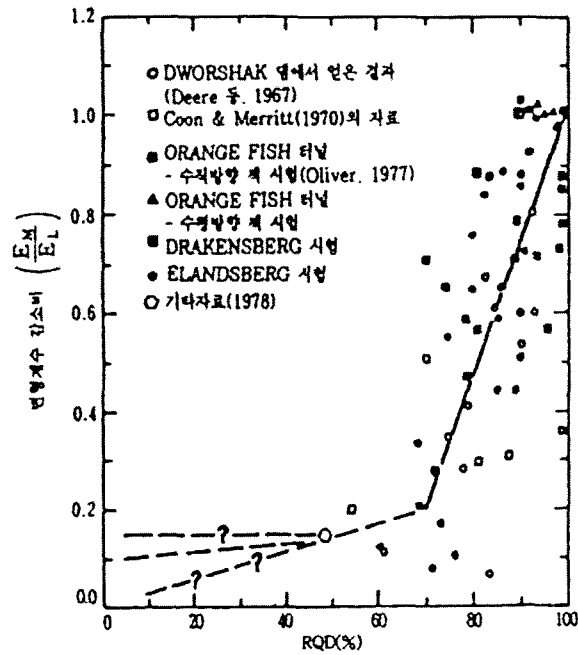


그림 7. RQD와 변형계수감소비의 관계

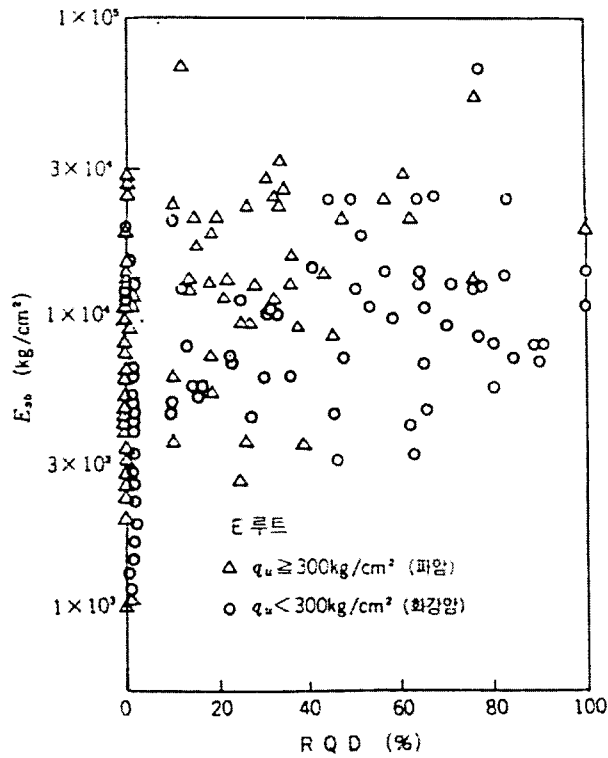


그림 8. RQD와 보링공내 변형계수(本四公團, 1972)

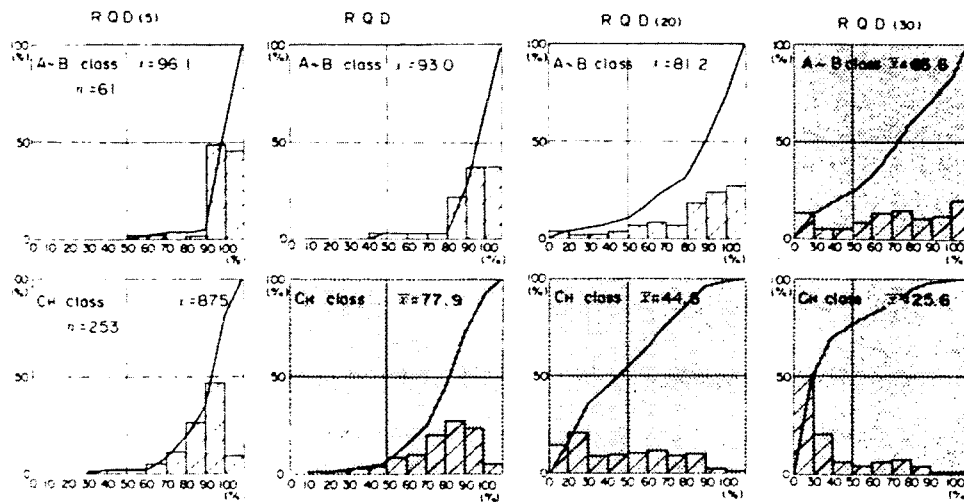
5) 암반등급과의 대응

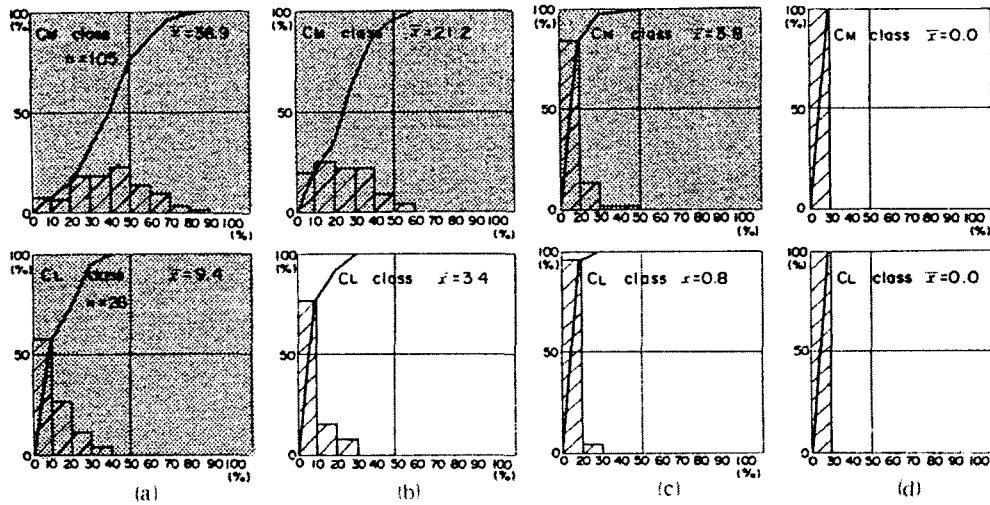
Kikuchi 등은 각 암반등급의 암반특성을 고려한 $RQD_{(N)}$ 을 고안하고 그 적용성을 검토했으며, $RQD_{(N)}$ 은 다음과 같이 정의할 수가 있다.

$$RQD_{(M)}(\%) = \frac{L_{(M)}}{\ell} \times 100$$

여기서, $L_{(N)}$: 단위구간 길이에서 N cm 이상 코어의 합계길이

ℓ : 단위구간 길이(통상 100cm)





RQD와 암반등급과의 대응에 관한 검토결과(평가기준길이 N이 5, 20, 30cm의 경우에 대하여 검토함)는 위 그림과 같이 RQD에서는 빈도분포의 중복이 많았던 C_L급과 C_M급이 RQD₍₅₎, C_H급과 B급이 RQD₍₃₀₎에서 각각의 빈도분포에 있어서도 명백한 차이가 인정되었다. 따라서 암반등급구분의 정량적 평가에 있어서는 RQD 및 RQD_(N)을 단독적으로 적용하는 것이 아니라 RQD₍₅₎, RQD, RQD₍₃₀₎을 한조로 사용함으로써 정량적 평가지수로의 적용이 가능함.

6) 현재 RQD는 시추코어의 logging에서 표준요소로 사용되고 있으며, 세계적으로 널리 사용되고있는 주요 암반분류 시스템인 RMR과 Q시스템에서 사용되는 기본요소이다. RQD가 간단하며 저렴한 지수임에도 불구하고 암반을 적절하게 묘사하는 것이 충분하지 못한 것은 절리의 방향이나 견고성, 충전물질 등을 고려하지 않고 단지 시추공내 절리간격 요소 하나만으로 지보량을 산정하기 때문에 한계가 있고, 절리가 얇은 점토 충전물 또는 풍화물질을 함유하는 지역에서도 제한을 갖는다. 이는 점토가 절리 경계면을 따라 마찰저항을 감소시키므로 절리간격이 넓고 RQD가 높더라도 불안정을 초래하기 때문이나 그 외의 조건에서는 이 시스템은 잘 적용될 수 있다.

참고문헌

- 이희근·양형식 외, 1997, 응용암석역학, 서울대학교출판부, p.122~131
- 이정인 외, 1997, 암석역학을 이용한 터널설계, 구미서관, p.129~131, p.172~175
- 허 전, 1985, 암석역학, 기전연구소, p.36~40
- 한국지반공학회, 2003, 지반조사결과의 해석 및 이용, 구미서관, p.613~616
- 윤지선 역, 1992, 토목지질공학, 구미서관, p.184~189
- 쏘일테크 엔지니어링 역, 2001년, 암반의 분류와 적용, 창우출판, p.31~38
- 윤지선 역, 1991, 암석·암반의 조사와 시험, 구미서관, p.116~120

신희순 외, 2000, 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, 구미서관, p.204~209
한국수자원공사 조사계획처, 1990, 지질공학적 분포특성의 적용을 통한 터널의 적정 설계
방안대책, p.100~101, p.120
조태진 · 이연규 공역, 2002, 경암굴착공동의 지보설계, 구미서관, p.40~42
한국암반공학회, 1998, 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술, p.558
신희순, 2000, 지반조사 및 시험결과 활용과 문제점, 한국암반공학회, p.105~110
Geotechnical Control Office, Civil Engineering Services Department, Hong Kong, 1987
GUIDE TO SITE INVESTIGATION, Government of Hong Kong, p.295
Geotechnical Control Office, Civil Engineering Services Department, Hong Kong, 1987
GUIDE TO ROCK AND SOIL DESCRIPTIONS, Government of Hong Kong, p.103
Bhawani Singh · R.K.Goel, 1999, ROCK MASS CLASSIFICATION, ELSEIVER
p.18~23