

도로터널에서 편마암 구간의 암반변형계수 산정 연구

Assessment of Deformation Modulus in Gneiss for Road Tunnel



김낙영*¹
Kim, Nag-Young



김성환*²
Kim, Sung-Hwan



정형식*³
Chung, Hyung-Sik

Abstract

Four road tunnels, which consists of biotite gneiss and granite gneiss and shows a similar geological conditions, were selected in this study. Laboratory and field tests, the rock mass rating for the four tunnels were conducted. A regression analysis was performed to find out the correlations of test results. It was proposed an equation of reduction factor which can assess the deformation modulus for biotite gneiss and granite gneiss. It was also found that there was a close correlation between Q and RQD in four tunnels according to the analysis between RMR and Q , RMR and RQD , Q and RQD and laboratory and field tests.

Keywords: Biotite gneiss, Granite gneiss, Regression, Deformation modulus

요지

본 연구에서는 지질적 조건이 유사하고 흑운모편마암과 화강편마암이 기반암으로 구성되어있는 도로터널 4개소를 선정하여 실내·현장시험 및 암반분류를 실시하였다. 그 결과에 대한 회귀분석을 수행하여 각각에 대한 상호관계를 분석하였다. 또한, 기반암으로 구성된 흑운모편마암과 화강편마암에 대한 실내시험결과를 활용하여 암반변형계수를 산정하기 위한 감쇠지수 산정식을 제시하였다. 본 대상터널에서 RMR 과 Q , RQD , 현장시험과 실내시험결과의 상관관계식에 대한 신뢰도를 분석하였다. 이들

*¹ 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

*² 정회원, 한국도로공사 도로연구소 수석연구원

*³ 정회원, 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

분석에서 Q와 RQD의 상관관계가 가장 밀접한 것으로 확인되었다.

주요어: 흑운모편마암, 화강편마암, 회귀분석, 변형계수

1. 서론

최근들어 급속한 경제성장으로 물류이동이 급증하고, 쾌적한 주행을 위한 선형확보를 위해 도로 신설공사와 확장공사가 증가하고 있다. 이에 따라 산지가 전 국토의 70%를 차지하고 있는 우리 국토의 지리적 특성상 터널공사는 필연적으로 증가하고 있다. 또한, 터널이 장대화 되어가는 추세이므로 터널의 안정성 검토와 지보재 산정에 직결되는 합리적인 암반강도정수 산정이 매우 중요하다.

특히, 터널모델링에 적용되는 주요한 강도정수의 하나인 암반변형계수는 현장조건을 고려한 현장시험을 실시하여 대표적인 값을 선정하는 것 하는 것이 바람직하다.

그러나 현장시험의 경우 과다한 비용과 시간이 소요되므로 현장시험을 무조건 실시하지 못하고 터널의 규모와 중요도에 따라 실시여부와 수량을 결정한다. 그러므로 지질적인 조건이 유사한 터널구간에 대한 실내·현장시험 결과를 분석하여 그 상관관계를 도출하여 현장시험에 제한이 있는 터널에 이 값들을 활용하여 암반변형계수를 산정하는 것이 좀 더 합리적이다.

따라서 본 연구에서는 터널구간의 기반암이 흑운모편마암과 화강편마암으로 구성되어 있고 지질적 조건이 유사한 도로터널 4개소를 선정하였다. 각각의 터널에 대하여 실내시험에 의한 암석의 영률을 측정하고 현장시험(공내재하시험)을 수행하여 측정된 변형계수와 RQD, RMR, Q 각각의 상관관계식을 분석하였다. 또한, 현장여건으로 인하여 암반변형계수 측정을 위한 현장시험등이 어려운 경우에 암반에 대한 RMR과 실내시험결과를 이용, 암반변형계수를 산정 할 수 있는 감쇠지수에 대한 식을 제시하였다.

2. 대상 터널 현황

본 연구를 위해 터널구간의 기반암이 흑운모편마암과 화강편마암으로 구성된 2차로 도로터널 4개소를 선정하여 실내시험과 현장시험(공내재하시험), 암반분류를 실시하였으며 각 현장에 대한 개요는 다음과 같다.

2.1 터널구간 기반암의 구성암석

본 터널구간의 조사된 암종별 특징을 요약하면 다음과 같다.

(1) 흑운모 편마암

① 특징

불규칙적인 절리가 발달되어 있지만 대규모의 단층이 분포하지 않고 석영성분이 많이 포함되어 있어 전반적으로 신선하고 강도가 강하며, 광물입자는 조립질이다.

② 구성광물

석영, 사장석, 카리장석, 흑운모, 각섬석

③ 역학적 특성

본 연구대상 4개 도로터널 구간에 대한 흑운모 편마암의 역학적 특성을 분석하기 위한 실내 및 현장시험수행결과는 표1과 같다.

표 1. 흑운모편마암의 역학적 특성

항목	결과치
압축강도	130 ~ 2390 kg/cm ²
인장강도	80 ~ 170 kg/cm ²
전기비저항	1900 ~ 46000Ωm
탄성파속도	1600 ~ 5700 m/sec
탄성계수	0.2 ~ 8.7×10 ⁵ kg/cm ²

(2) 화강편마암

① 특징

국부적으로 화강암질화가 많이 진행되어 있으며, 약간의 엽리가 보이고, 주변의 화강암관입 시에 화강암질화되어 석영성분이 많다.

② 구성광물

석영, 카리장석, 미사장석, 사장석, 흑운모, 녹니석, 견운모

③ 역학적 특성

본 연구대상 터널의 기반암인 화강편마암의 역학적 특성은 표2와 같다.

표 2. 화강편마암의 역학적 특성

항목	결과치
압축강도	450 ~ 2400 kg/cm ²
인장강도	30 ~ 160 kg/cm ²
전기비저항	1400 ~ 16000 Ωm
탄성파속도	3200 ~ 5700 m/sec
탄성계수	0.9 ~ 8.4 × 10 ⁵ kg/cm ²

2.2 대상터널 암반분류

암반이 가지는 복잡한 성질과 조건을 고려하여 터널의 굴착조건과 지보형식을 결정하기 위한 중요한 요소 중 하나인 암반의 분류이다. 표3에서는 암반분류 방법을 정성적·정량적 방법을 구분하였으며, 본 연구에서는 RMR과 Q방법을 적용하였다.

표 3. 암반 분류방법

분류명	제안자	방법	적용
암하중법	Terzaghi(1946)	정성적	
지지시간법	Lauffer(1958)	정성적	
RQD	Deere(1967)	정량적	
RSR	Wickham(1972)	정량적	
RMR	Bieniawski(1973)	정량적	◎
Q	Barton(1974)	정량적	◎

(1) RMR 분류기준

현장 및 시추자료에 의한 6가지 변수(일축압축강도, 불연속면의 간격, 불연속면의 상태, 불연속면의 방향, 암질 지수, 지하수 조건)에 0~100까지 점수를 주어 암반을 5등급으로 구분하여 평가하는 방법이다. RMR방법은 적용영역이 넓고 각 요소들에 대한 평가가 매우 용이하고 터널과 불연속면의 방향성에 대한 고려가 가능하다. 암반 등급에 따라 터널 폭, 자립시간, 필요 지보량 및 암반의 물리적 성질등을 결정할 수 있다.

(2) Q-system 에 의한 분류

스칸디나비아의 200여개의 터널 사례연구를 근거로 작성된 분류체계로 현장의 6가지변수(불연속면의군수, 불연속면의 거칠기, 불연속면의 변질정도, 응력감소 계수, 암질지수, 지하수 조건)을 3개의 항으로 구분하여 이들을 곱으로 0.001~1000점까지 점수를 산정하고 이들을 다시 9등급으로 구분하여 암반을 평가하는 방법이다. 세밀한 분류를 통해 체계적이고 구체적인 보강방안이 제시되고 터널의 폭과 높이가 범위의 넓고 지보의 선택범위가 상세하다. 또한 굴착지보비에 의해 터널의 목적이 반영되므로 팽창 또는 압착성 지반조건에 적용성이 양호하다.

본 연구대상 터널들에 대하여 RMR분류와 Q분류방법을 적용하였고 4개 터널들의 개요 및 수행된 암반등급분류는 다음과 같다.

2.2.1 A 터널의 개요 및 암반분류결과

(1) 개요

- 연장: (상행) = 2070 m, (하행) = 2010 m
- 폭원: 11.3 m, 높이: 8.3 m, 2차로, NATM

(2) RMR 분류와 Q 분류방법

A 터널의 RMR과 Q분류에 의한 등급별 비율은 그림 1, 그림 2와 같다.

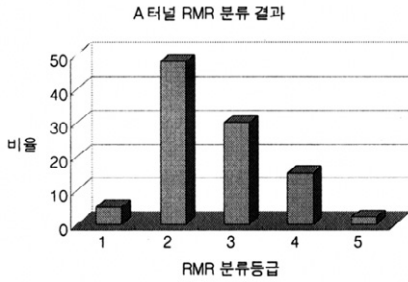


그림 1. A 터널 RMR 등급별 분류 비율

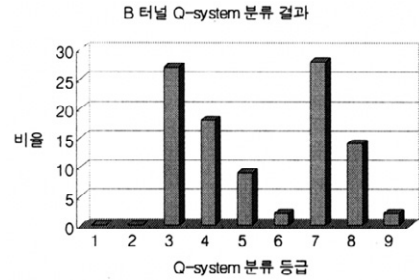


그림 4. B 터널 Q-system 등급별 분류 비율

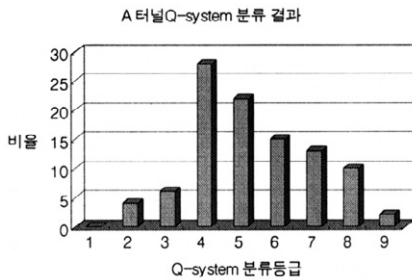


그림 2. A 터널 Q-system 등급별 분류 비율

2.2.3 C 터널의 개요 및 암반분류결과

(1) 개요

- 연장: (상행)= 2655 m, (하행)= 2730 m
- 폭원: 11.3 m, 높이: 8.3 m, 2차로, NATM

(2) RMR 분류와 Q 분류 결과

C 터널의 RMR과 Q분류에 의한 등급별 비율은 그림 5, 그림 6과 같다.

2.2.2 B 터널의 개요 및 암반분류결과

(1) 개요

- 연장: (상행) = 2770 m, (하행)= 2775 m
- 폭원: 11.3 m, 높이: 8.3 m, 2차로, NATM

(2) RMR 분류와 Q 분류 결과

B 터널의 RMR과 Q분류에 의한 등급별 비율은 그림 3, 그림 4와 같다.

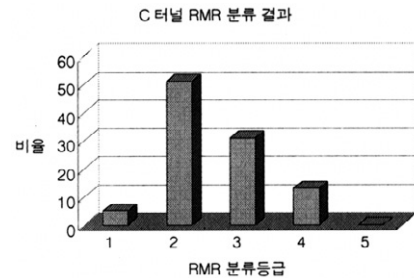


그림 5. C 터널 RMR 등급별 비율

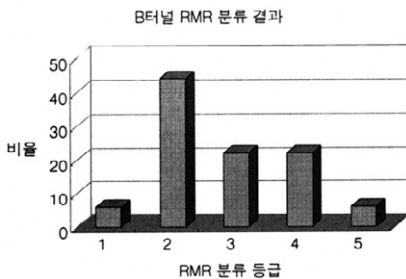


그림 3. B 터널 RMR 등급별 분류 비율

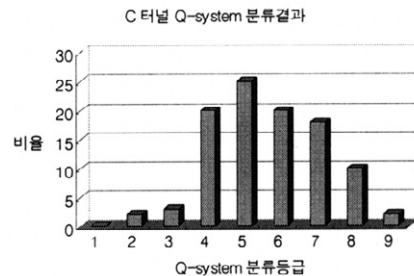


그림 6. C터널 Q-system 등급별 비율

2.2.4 D 터널의 개요 및 암반분류결과

(1) 개요

- 연장: (상행선)= 420 m, (하행선)= 426 m
- 폭원: 11.3 m, 높이: 8.3 m, 2차로, NATM

(2) RMR 분류와 Q 분류 결과

D 터널의 RMR과 Q분류에 의한 등급별 비율은 그림 7, 그림 8과 같다.

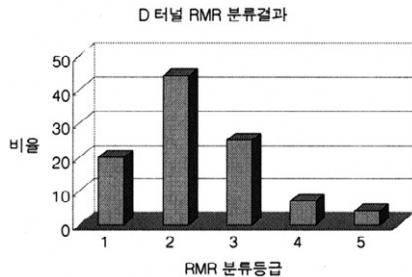


그림 7. D 터널 RMR 등급별 비율

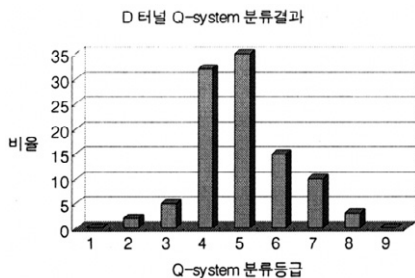


그림 8. D 터널 Q-system 등급별 비율

3. 실내시험, 현장시험 및 암반분류결과와 상관관계 분석

본 연구에서는 각 변수간의 상관관계를 추정해내기 위해 회귀분석모형을 이용하여 분석하였다. 특히, 종속변수

와 독립변수와의 관계가 선형관계에 있다고 가정한 선형 회귀분석 모형과 비선형관계식을 로그 선형함수로 변형시킨 로그-선형 회귀분석 모형을 적용하였다. 통상적인 선형회귀 분석모형의 기본식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_N X_N \quad (1)$$

여기서 Y는 종속변수이고, 모형의 N번째 독립변수를 뜻하는 것이며, 모형에 의해 추정된 α_N 은 독립변수 N이 단위변화량에 따른 독립변수(Y)의 변화량을 말한다. 이러한 모형은 종속변수와 독립변수간에 선형관계가 존재해야함을 전제로 하며, 그 때 종속변수는 독립변수에 의해 설명될 수 있다. 또한 복수의 종속변수를 포함하는 모형의 경우, 각 변수간의 상관관계에 대한 분석을 시도하여 그 적절성 여부를 판단해야 한다. 종속변수와 독립변수간의 관계가 선형이 아닌 경우에는 비선형 회귀식을 이용하여 이를 분석할 수 있으며, 그 기본 모형식은 다음과 같다.

$$Y = \alpha_0 \cdot X_1^{\alpha_1} \cdot X_2^{\alpha_2} \dots \cdot X_N^{\alpha_N} \quad (2)$$

상기 함수식은 각 변수에 대한 종속변수의 탄력성이 고정적이라는 특성을 갖고 있다. 즉 어느 한 독립변수 X_N 이 1% 증가할 때 Y는 $\alpha_N\%$ 만큼 고정적으로 변화한다는 것이다. 이러한 비선형 모형을 선형화하기 위해 상기식의 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ln Y = \ln \alpha_0 + \alpha_1 \ln X_1 \dots + \alpha_N \ln X_N \quad (3)$$

위와 같이 선형화된 모형은 일반적인 선형 회귀분석 모형과 동일한 방법으로 선형계수를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 선형회귀식과 비선형회귀식의 모델을 채택하여 각 추정 변수간의 상관관계를 분석하였다.

3.1 터널모델링을 위한 암반변형계수 산정

터널모델링을 위한 입력자료 산정시 암반의 변형계수 산정은 다음식들과 같이 실내시험에서 구한값을 이용하거나 혹은 현장조건을 고려한 암반분류 즉, RMR, RQD 또는 Q 와의 관계식을 이용하여 실내시험치를 보정하여 터널모델링에 적용한다. 일반적인 변형계수 산정방법은 다음과 같다.

(1) 현장시험

현장시험은 암종에 따라 Elastmeter, Goodman Jack 공내재하시험기를 이용하여 현장 변형계수를 측정한다.

(2) 실내시험보정방법

RMR 값과 그에 해당하는 실내시험에서 얻은 탄성계수를 이용하여 암반 변형계수 산정한다.

$$RF = \frac{E_m}{E_{int}} = 0.0028 RMR^2 + 0.9 \exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right) \quad (4)$$

(Nicholson & Bieniawski, 1990)

$$RF = \frac{E_m}{E_{int}} = 0.5 \times \left[1 - \left\{ \cos\left(\pi \times \frac{RMR}{100}\right) \right\} \right] \quad (5)$$

(Mitri et al., 1994)

$$E_m = f \times E_{int} \quad (6)$$

(Cording et al., 1972)

(3) RMR과 Q값에 의한 경험식

사례 분석을 통해 RMR과 Q값 사이 상관 관계를 이용 암반 변형계수 산정한다.

$$E_m = 2RMR - 100 \text{ (GPa)}; RMR > 50 \quad (7)$$

(Bieniawski, 1978)

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \text{ (GPa)}; RMR \leq 50 \quad (8)$$

(Serafim & Pereira, 1983)

$$E_m = 0.0097 RMR^{3.55} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

(Aydan, 1997)

$$E_m = 25 \times \log_{10} Q \text{ (GPa)}; 1 \leq Q \leq 100 \quad (10)$$

(Barton & Grimstad)

(4) GSI에 의한 방법

서로 다른 지질조건에 따른 암반강도의 감쇠지수를 추정하기 위해 GSI라는 변수를 도입, RMR의해 평가되는 변형계수를 보완하여 암반이 변형계수 산정한다.

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \text{ (GPa)} \quad (11)$$

$$E_m = 10^{\frac{GSI-10}{40}} \text{ (GPa)} \quad (12)$$

(5) 감쇠지수 산정

현장여건상 현장시험이 어렵고 시험수량이 한정될 경우에 암반에 대한 RMR과 시험실에서 구한 영률을 이용하여 암반변형계수를 구할 수 있는 감쇠지수(RF) 값을 식 (13)과 같이 제시하였다.

$$RF = \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{RMR}{100}\right) \right]^{3.0523} \quad (13)$$

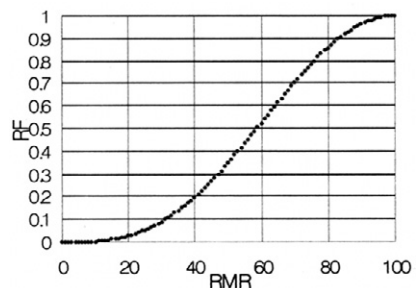


그림 9. 4개터널의 RF와 RMR 관계

3.2 실내 및 현장시험과 결과분석

암반의 공학적 특성을 분석하고 터널 구조해석을 위한 강도정수평가를 위한 현장시험으로 연구대상 4개 터널에서는 공내재하시험을 적용하였다.

공내재하시험은 지반조사에서 시추공을 이용하여 지반변형계수를 측정할 수 있는 방법으로 토질용 시험기와 암반용 시험기로 구분되며 암반에서의 공내재하시험은 주로 변형계수측정을 위하여 실시한다. 이 방법은 현재 암반의 변형계수산정에 있어서 비교적 객관성이 높은 원위치 시험으로서 널리 사용되고 있고 공내재하시험결과의 신뢰성을 높이기 위해 암반상태에 따라 재하방식을 다음과 같이 구분하여 실시하였다.

(1) 등압분포 재하법 (풍화암, 연암)

보링공내에 고무튜브의 측정관을 삽입하고 그것에 가압액이나 공기를 빼내는 것에 의해 공벽에 등분포하중을 주는 방식이다. 이 방식의 특징은 시험공 공벽에 대하여 동등한 하중이 가해지기 때문에 응력분포가 축대칭이 되고 이론적인 취급에 용이한 것이다. 그러나 불균질한지반이나 이방성 지반의 경우에 얻어지는 변형계수등은 시험 지점의 공벽 전둘레의 평균값이 된다.

$$E = (1 - \nu) \cdot R_m \cdot \frac{P_y - P_o}{R_y - R_o} \quad (14)$$

E : 변형계수 (kg/cm²), ν : 포아송비

P_y : 항복압력 (kg/cm²)

P_o : 초기압력 (kg/cm²)

R_y : P_y 일때의 변형(cm)

R_o : P_o 일때의 변형(cm)

$$R_m : R_m = \frac{R_o - R_y}{2}$$

(2) 등변위재하법 (보통암, 경암)

직사각형의 강제 재하판을 장전한 프루브를 시험공 공내에 삽입하고 유압잭으로 재하판에 의하여 공벽에 하중을 작용시키는 것이다. 이 방법은 시험시의 지반내 응력분포가 복잡하지만 등압분포재하법보다 큰 하중을 작용시킬 수 있는 장점이 있다.

$$E = 0.86 \cdot K(V) \cdot \frac{\Delta Q \cdot d}{\Delta U_d} \quad (15)$$

ΔQ : 압력 증가분

ΔU_d : 변위의 증가분

d : 시추공 직경

K(V): 상수

상기와 같이 본 논문에서 암종에 따라 각각의 다른 방법을 적용하여 암반변형계수를 구하였고 실내시험과 현장시험결과를 분석하여 식(16)과 같은 상관관계를 도출하였다.

$$E_m = 42652 + 0.2321 \times E_{int} \quad (16)$$

E_m : rock mass의 변형계수

E_{int} : intact rock의 변형계수

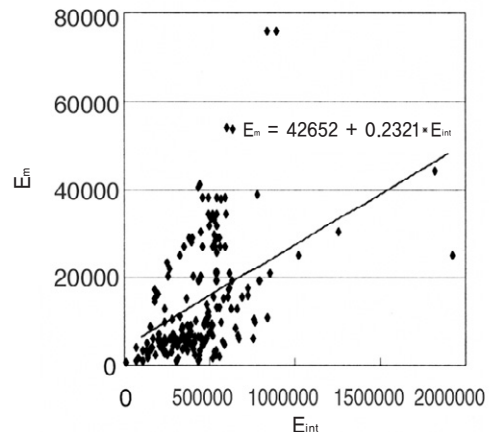


그림 10. 실내시험과 공내재하시험 분석결과

3.3 RMR, Q, RQD 상관관계 분석

본 연구대상 4개 도로터널에서 조사분석된 RMR, Q, RQD의 상관관계는 그림 11, 그림 12, 그림 13과 같이 회귀분석을 통해 식(17), 식(18), 식(19)를 도출하였다.

$$RMR = 42.7727 Q^{0.1283} \quad (17)$$

$$RMR = 34.718 + 0.351 \times RQD \quad (18)$$

$$Q = 0.004642 \times RQD^{1.805} \quad (19)$$

조사분석된 각각 변수들의 상관관계는 그림 13과 같이 Q와 RQD의 관계가 가장 밀접한 것으로 분석되었다.

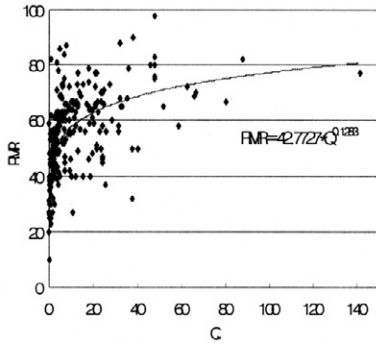


그림 11. RMR과 Q 회귀분석결과

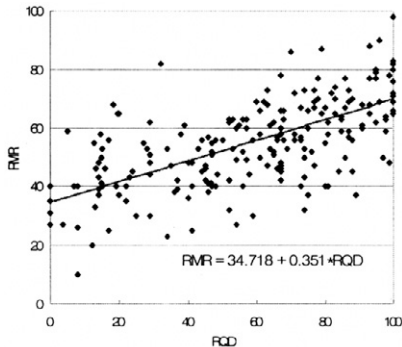


그림 12. RQD와 RMR 회귀분석결과

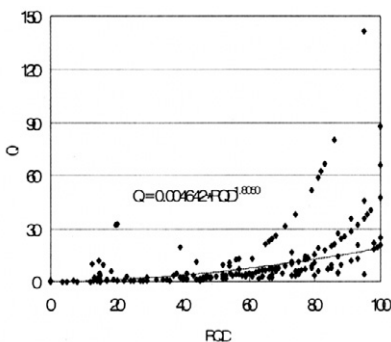


그림 13. RQD와 Q 회귀분석결과

4. 결론

본 연구에서는 흑운모 편마암과 화강편마암이 기반암으로 구성된 구간에서 지질적 조건이 유사한 도로터널 4개소를 선정하여 실내·현장시험을 분석하였다. RMR과 실내시험값을 활용하여 암반변형계수를 구하기 위한 감소지수(RF)에 대한 식을 제시하고 RMR과 Q, RMR과 RQD, Q와 RQD의 상관관계를 유도하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구대상 터널들의 기반암은 흑운모 편마암과 화강편마암으로 구성되어 있고 역학적 특성은 다음과 같다.

- 흑운모편마암

압축강도 : 30 ~ 2390 kg/cm²

인장강도 : 80 ~ 170 kg/cm²

전기비저항 : 1900 ~ 46000 Ωm

탄성파속도 : 1600 ~ 5700 m/sec

탄성계수 : 0.2 ~ 8.7 × 10⁵ kg/cm²

- 화강편마암

압축강도 : 450 ~ 2400 kg/cm²

인장강도 : 30 ~ 160 kg/cm²

전기비저항 : 1400 ~ 16000 Ωm

탄성파속도 : 3200 ~ 5700 m/sec

탄성계수 : 0.9 ~ 8.4 × 10⁵ kg/cm²

(2) 본 연구대상 4개소 터널구간의 기반암을 구성하고 있는 흑운모편마암과 화강편마암에 대한 RMR과 실내·현장시험(공내재하시험)결과 분석을 통하여 이와 유사한 암종으로 구성된 터널구간에서 현장여건상 현장시험이 어려울 경우에 RMR과 실내시험값을 활용, 암반의 변형계수를 구하기 위한 감쇠지수(RF)식을 다음과 같이 제시하였다

$$RF = \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{RMR}{100} \right) \right]^{3.0523}$$

(3) RMR과 Q, RMR과 RQD, Q와 RQD, 공내재하시험결과와 실내시험결과를 회귀분석하여 다음과 같은 상관관계식을 제시하였다.

$$RMR = 42.7727 Q^{0.1283}$$

$$E_m = 42652 + 0.2321 \times E_{int}$$

$$RMR = 34.718 + 0.351 \times RQD$$

$$Q = 0.004642 \times RQD^{1.805}$$

(4) 각 변수들에 대한 상관관계식의 신뢰도 분석결과 Q와 RQD의 상관관계가 가장 밀접한 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 한국도로공사 (1998), "도로설계를 위한 지반조사 기술 Workshop", pp. 297-314
2. 한국도로공사 (1995), "고속도로 터널설계실무자료집", pp. 111-127
3. Kaser, P.K. (1980), "Effect of stress-history on the deformation behavior of underground openings", 13th Canadian Rock Mechanics Symp., CIMM, Montreal, pp. 133~140
4. Jeremic, M. L. "Ground Mechanics in Hard Rock mining", Balkema, pp. 415~501
5. Bieniawski, Z.T., "Determination of rock mass deformability; Experience from case histories, Int. J. Rock Mech. Sci & Geomech. Abstr., pp. 237-247
6. Carmichael, R.S.(1989), "Practical Hand book of Physical Properties of Rocks and Minerals", pp. 139-209
7. Nicholson, G. A. and Bieniawski, Z. T. (1990), "A Nonlinear Deformation modulus based on rock mass classification", Int. J. Min & Geological Eng, pp.181-202
8. Mohammad, N., Reddish, D. J., and Stance, L. R. (1997), "The relation between in situ and laboratory rock properties used in numerical modelling", Int.J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech, Abstr., Vol.34, No2, pp. 181-202.