

터널 안정성해석을 위한 암반의 설계정수 산정에 대한 고찰

장 석 부¹⁾, Seok-Bue Chang, 이 재 옥²⁾, Jae-Wook Lee

1) (주) 유신코퍼레이션 터널부 이사, 공학박사

2) (주) 유신코퍼레이션 응용지질부 대리, 이학석사

1. 서 론

터널설계를 위한 안정성해석에 있어서 대상암반의 설계정수는 가장 주요한 영향요소이므로 이에 대한 산정방법은 현재까지도 많은 연구가들에 의하여 제시되고 있다. 가장 이상적인 것은 대상암반에 대한 원위치시험을 수행하는 것이 바람직하나, 암반의 변형계수측정을 위한 공내재하시험 외에는 대부분의 시험이 불연속면이 포함되지 않은 신선암(Intact Rock)에 대한 실내시험이 이루어지고 있다. 따라서, 실내시험에 의한 신선암의 물성을 보정하여 암반의 물성을 적용하려는 시도가 많은 연구자들에 의하여 시도되어 왔다.

신선암의 물성보정에는 암반의 상태를 정량적으로 나타내는 RMR, Q, GSI 와 같은 암반분류법이 적용되고 있다. 신선암과 암반 물성간의 상관관계는 대상지역의 지형, 지질, 기상 등과 밀접한 관계가 있다. 즉, 암반의 기본적인 물성은 신선암을 바탕으로 하나, 지각운동과 풍화 등에 의하여 불연속면이 생성되고 암석과 불연속면이 열화됨으로써 본래의 암석에 비하여 저하된 물성을 갖게 된다. 따라서, 대상 지역의 특성에 따라 암석과 암반의 물성치는 다양한 상관관계를 가지고 있으며, 이는 기존의 많은 외국의 연구사례가 입증하고 있다.

국내 터널해석을 위한 설계정수 산정에는 일반설계(기본설계, 실시설계) 또는 경쟁설계(턴키 및 대안)에 따라 다른 방법이 적용되고 있다. 일반설계시에는 조사자료에 대한 고찰없이 몇 개의 기존 연구사례에 의하여 산출된 물성치를 평균하여 적용하는 경우가 많다. 그러나, 이것은 대상 암반의 지질적 특성과 상이한 사례를 무조건적으로 참조하는 오류를 범하게 되는 원인이 될 수 있다. 즉, 현장자료의 세밀한 분석보다는 가능한 많은 사례를 참조하여 평균함으로써 설계정수 산정에 대한 책임을 회피하려는 경향이 크다. 반면에, 경쟁설계시에는 통계적 방법의 남용이 두드러지는 경향이라 할 수 있다. 설계정수 값 자체보다는 산정과정에서 현란한 기법을 활용하여 우수한 설계평가를 받도록 의도하는 경우가 많다. 이는 설계정수 값 자체에 대한 확신을 누구도 할 수 없기 때문에 산정과정을 의도적으로 부각시키기 위한 것으로 여겨진다. 그러나, 많은 경우에 적절치 못한 통계적 방법이 적용되고 있으며, 통계적 결과의 인위적 개입이 충분히 가능하기 때문에 객관적인 결과로 인정할 수 없는 문제점이 있다. 그리고 대부분의 경우, 산정된 설계정수 값을 기존에 적용하고 있던 값과 비교하여 그 적정성을 검토하는 경우가 많다. 그러나, 국내의 경우 설계단계에서 적용된 설계정수에 대한 현장검증이 이루어진 적은 거의 없기 때문에 관행적으로 터널안정해석에 적용된 값과 비교하는 것은 적절치 않다.

이에, 본 논문에서는 국내에서 적용되고 있는 설계정수 산정방법을 변형계수를 대상으로 검토하였고 바람직한 개선방향을 제안하였다.

2. 암반분류에 의한 변형계수 산정 및 고찰

2.1 암반분류를 이용한 경험적 방법

1) RMR을 이용한 방법

암반분류법 중에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 RMR을 이용한 암반의 변형계수 산정법은 많은 연구자들에 의하여 제시되어 왔으며, 그 중 주요 제안식을 소개하자면 다음과 같다.

- ① Bieniawski, 1978 : $E_m = 2 \times RMR - 100$ (GPa) : $RMR > 50$, $q_c > 100$ Mpa
- ② Serafim & Pereira, 1983 : $E_m = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}$ (GPa) : $RMR < 50$, $q_c > 100$ Mpa
- ③ Aydan, 1997 : $E_m = 0.0097 \times RMR^{3.54}$ (MPa)
- ④ 국내현장에 : $E_m = 0.0172 \times RMR^{1.78}$ (GPa)

위 제안식 들은 상당히 단순한 식으로 구성되어 있어 현장 및 실내 시험자료가 매우 부족한 예비검토 단계에서는 효과적으로 사용할 수 있으나, 각종 시험자료가 많은 실시설계 단계에서 적용하는 것은 부적절하다고 판단된다. 왜냐하면, 저자에 따라 제안식이 다른 이유는 각 저자의 연구대상 지역에 따른 지질특성에 의하여 변형계수는 RMR과 다른 상관성을 갖기 때문이다. 특히, RMR과 변형계수의 상관성이 선형함수식인지 지수함수인지 조차 제안자에 따라 상이하다. 그러나, 그림 1에서 보는 바와 같이 실제로 ①, ② 식과 ③식의 차이는 크지 않으며, RMR이 50 이상인 경우에는 매우 근사하고 이하인 경우에 다소 차이를 보이고 있다. 이는 문헌상의 확인은 못했으나, 동일자료를 가지고 회귀분석하는 경우에는 상관식의 함수형태는 다르더라도 계수들에 의하여 유사한 결과를 보일 수도 있기 때문이다.

그러나, 국내의 설계단계에서 수행된 많은 사례 ④에 의하면, 다소 차이를 보임을 알 수 있다. 개별 프로젝트에서는 통계적으로 만족할 만한 시험자료를 구할 수 없는 문제가 있으나, 국내 시험자료에 대한 체계적인 자료수집 및 분석이 수행된다면, 우리나라의 지질특성에 적합한 상관식을 만들어 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 이 때, RMR 평가항목 중 6번째 항목인 터널과 불연속면의 상대적 특성을 고려하여야 한다. 이것은 대상암반 고유의 특성이 아니라 터널시공조건을 고려한 것이기 때문이다.

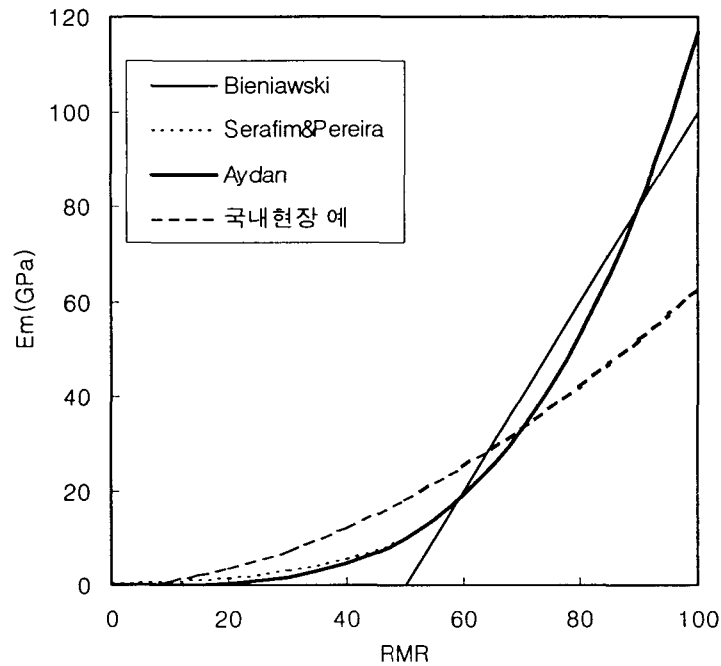


그림 1. 변형계수와 RMR 상관관계

2) GSI(Geological Strength Index)를 이용한 방법

GSI는 Hoek에 의하여 제안된 것으로 암반구조와 절리면특성의 2가지 인자를 가지고 암반의 강도지수를 정량적으로 나타낸 것이다. GSI에 의한 변형계수 산정법의 특징은 신선암의 압축강도와 굴착방법에 따른 암반 교란도를 추가로 고려한 것이다.

· Hoek & Brown(2002)

$$-. E_m = 10^{\frac{GSI-10}{40}} \times \frac{\sqrt{\sigma_c(MPa)}}{100} \times (1 - \frac{D}{2})(GPa) \quad \sigma_{ci} \leq 100MPa$$

$$-. E_m = 10^{\frac{GSI-10}{40}} \times (1 - \frac{D}{2})(GPa) \quad \sigma_{ci} > 100MPa$$

여기서, GSI : Geological Strength Index,

$$GSI = RMR_{89} - 5 \text{ for } GSI \geq 18 \text{ or } RMR \geq 23$$

$$= 9 \ln Q^* + 44 \text{ for } GSI \leq 18 \quad (Q^* = [RQD/J_n] \cdot [J_r/J_a])$$

D : disturbance factor

신선암의 압축강도를 추가로 고려한 이유는 GSI 평가에 암석의 압축강도가 고려되지 않았기 때문으로 생각된다. 이 방법의 적용시에는 RMR에 비하여 터널과 불연속면의 상대방위가 고려되지 않는 점에 주목할 필요가 있다.

3) Q와 압축강도를 이용한 방법

Q값은 적용사례가 점차 늘고 있는 방법으로써, Barton에 의하여 다음과 같은 제안식이 제시된 바 있다.

· Barton (2002)

$$-. E_m = 10 \cdot Q_c^{1/3} \text{ (GPa)} \quad Q_c = Q \times \frac{\sigma_c \text{ (MPa)}}{100} : Q > 1, \text{ RMR} > 50$$

(σ_c 가 100MPa보다 작을 경우 보수적인 해석이 됨.)

$$-. E_m = 10^{(15 \cdot \log Q + 40)/40} \text{ (GPa)} \quad Q < 1, \text{ RMR} < 50 :$$

(상기 식에서 RMR과 Q의 상관관계는 $\text{RMR} = 15 \log Q + 50$ 을 적용)

상기식에서 압축강도를 포함시킨 것은 Q값 산정에 신선암의 압축강도가 제대로 반영되지 않았기 때문으로 생각된다. 특히, 암반조건이 양호하여 Q값이 큰 경우에는 암반의 변형특성은 모암의 변형특성에 크게 의존하며, 자유면이 폐합된 형태의 터널 경우에는 그 현상이 더 크다. 따라서, Q를 이용한 상관식 작성에는 이 점을 고려할 필요가 있다.

4) 심도(H)를 고려하는 경우

원칙적으로 심도는 암반의 변형특성 인자라기 보다는 암반하중 인자로 보는 것이 적절하지만, Q나 RMR 외에 심도를 고려한 사례가 있다. 이는 근본적으로 암반분류에 의한 암반평가법들이 심도에 따른 암반특성을 잘 반영하지 못하거나 현재 해석모델로 적용되고 있는 선형탄성모델이 이러한 암반특성을 잘 반영하지 못하는 것으로 볼 수 있다. 실제로, 현장 시험자료를 분석해 보면, 터널심도에 따른 경향이 많이 발견되곤 한다. 따라서, 현장시험자료의 분석시 터널심도의 범위가 큰 경우에는 심도에 대한 경향분석을 수행할 필요도 있을 것으로 생각된다.

· Singh(1997), for weak and nearly dry rock mass

$$-. E_d = H^{0.2} \cdot Q^{0.36} \text{ (GPa)} \quad H : \text{depth(m)} (>50\text{m})$$

· Verman(1993) : for dry and weak rock mass ($q_c < 100 \text{ MPa}$)

$$-. E_d = 0.3 \times H^a \times 10^{\frac{\text{RMR}-20}{38}} \text{ (GPa)} \quad a = 0.16 \sim 0.3 \text{ (higher for poor rocks),}$$

H = depth ($\geq 50\text{m}$)

2.2 암석 실내시험결과의 보정

본 방법은 현장시험에 비하여 수행이 용이한 실내시험 결과를 이용하여 암반의 변형계수를 산정하는 것으로 주요 제안식은 다음과 같다.

① Nicholson & Bieniawski (1990)

$$RF(\%) = \frac{E_r}{E_i} = 0.0028RMR^2 + 0.9 \exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right)$$

② Mitri, et al.(1994)

$$RF = \frac{E_r}{E_i} = 0.5 \times \left[1 - \cos\left(\pi \times \frac{RMR}{100}\right)\right]$$

암석의 기본특성으로부터 암반의 특성을 예측하는 방식은 원칙적으로는 바람직하나, 현재까지 연구된 바에 의하면, 그림 2와 같이 큰 차이를 보이고 있다.

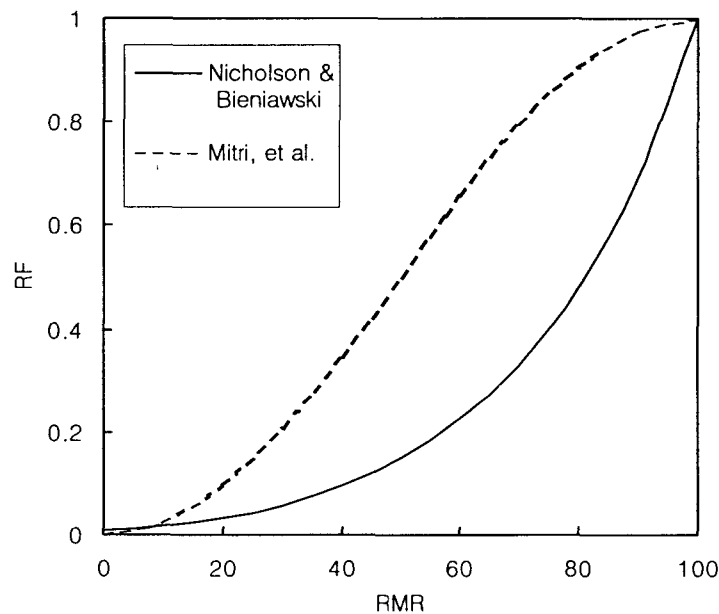


그림 2. 변형계수와 RMR 상관관계

2.2 공내재하시험의 결과활용

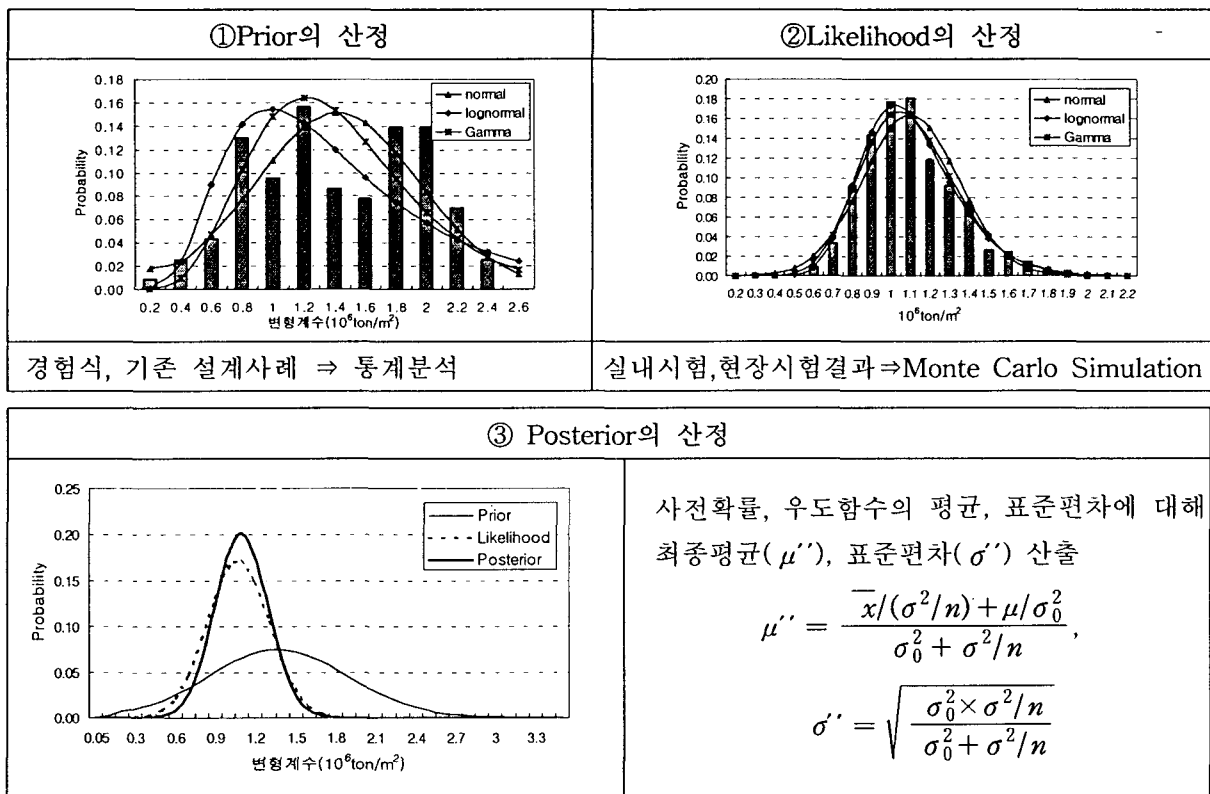
현장 시추공에서 직접 행해진 공내재하 시험의 결과를 이용하는 것이 가장 합리적인 현지 암반의 변형계수가 될 수 있다. 그러나 모든 심도와 모든 지점에서의 재하 시험을 시행할 수는 없으므로 대개 RMR과 변형계수의 상관계수를 구하여 사용한다. 이때 암반 등급에 따른 변형계수를 설정하여 해석에 이용하게 된다.

상기한 다양한 방법을 모두 이용하여 변형계수를 산정하고자 할 경우 각 경험식들의 편차가 매우 크게 나타나 적절하고 합리적인 변형계수의 산정이 힘들게 된다. 따라서 현지 조건에 가장 잘 부합하는 식을 선택하거나 현장 암반의 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 수식을 만들어 사용하여야 한다.

3. Bayesian Approach를 이용한 설계정수 산정에 대한 고찰

최근 턴키설계에서 많이 사용되고 있는 Bayesian Approach는 어떤 변수의 초기 추정치를 알고 있는 상태에서, 이후 추가적인 자료가 도입될 경우 초기 추정치를 합리적으로 재추정하는 방법으로 쓰이고 있다.

즉, 다양한 암반분류에 의한 경험식을 Prior로 실내 시험 및 현장 시험결과 산정된 값을 Likelihood로 산정하게 되며 이들이 모두 정규 분포라는 가정하에 다음이 성립하게 된다.



위에서 나타난 바와 같이 현행 T/K에서 Bayesian적용시 다음과 같은 문제점이 나타난다

① Prior의 정의

사실상 Prior는 우리가 어떤 성질을 알고 있는 모집단이며, Likelihood는 그 모집단에 속한다고 생각된 집합에서의 표본집단이 된다. 따라서 여기서 말하는 Prior를 알고 있다는 것은 이미 과업구간의 지반 물성치를 알고 있는 상태라는 뜻이며, 이 중에서 몇 개의 표본집단을 추출하여 실험이나 시험을 통해 알아낸 표본의 값이 Likelihood가 된다. 암반은 매우 불확실한 요소이며, 구하고자 하는 대상인 지반의 물성치는 우리가 관심을 가지고 있는 구간 혹은 지역에서의 물성치이다. 따라서 Prior는 우리가 대상으로 삼는 지반이 일반적으로 어떠한 값을 가진다는 것을 안다는 것이 되며, 이를 기존 RMR분류에 의한 경험식으로 대체하기는 힘들다.

또한 일부 설계의 경우에는 Prior의 값들로 Monte-Carlo Simulation을 한 것으로 되어 있는데, 이는 앞서서 설명한대로 서로 다른 식들을 가지는 값들을 Monte-Carlo Simulation을 할 수는 없으므로 전적으로 모순된다.

② Likelihood의 정의와 표본집단의 갯수

Likelihood를 정의 하는 경우 대부분의 T/K에서 MonteCarlo Simulation을 적용하는 것으로 되어 있다.

하지만, 여기서 주요한 오류가 생기는데, 이는 Posterior를 구하는 과정의 계산식에서 표본 집단의 자료수, n 을 정의하는 데서 문제가 생긴다. 원래 n 값은 표본의 개수 즉, 모집단의 성질이 일반적으로 알려진 집합에서 몇 개의 자료를 추출하여 이를 검사하는 것인데, 이를 Monte-Carlo Simulation을 적용하여 1000회의 generation을 시키게 되면, 표본의 개수가 1000개가 된다. 이 1000개의 표본수를 Posterior를 구하는 계산에 적용하면 Posterior의 평균은 Likelihood에 근접하게 된다. 즉 1000개의 자료수는 거의 모집단에 근접하게 되는 것으로 자료의 개수가 충분해지면 Bayesian approach를 적용할 필요가 없게 된다. 따라서 Monte-Carlo simulation을 likelihood함수를 정의하기 위해 사용하면 모순이 된다.

③ 정규 분포의 가정

현재 T/K에서 적용하는 Posterior계산식은 Prior와 likelihood가 모두 정규분포라고 가정하고 있다. 그러나 실제 이들의 함수는 χ^2 나 K-S test를 이용하게 되면 정규분포가 아닌 함수인 것으로 나타날 수 있는데 이 경우의 Bayesian approach의 적용법에 대해서는 검증이 곤란하다. 따라서, 대부분의 경우 모든 함수가 정규분포인 것으로 가정하고 있으며, 분포 함수에 대한 검증은 의미가 없게 된다.

4. 맺음말

최근 턴키 및 대안설계가 증가하면서 일반설계에 비하여 다양한 지반조사와 조사수량이 증가되고 있는 것은 바람직한 현상이라 할 수 있다. 그러나, 대부분의 경우에는 조사수량을 적절히 활용하지 못하거나, 조사자료에 대하여 지나치게 복잡한 통계처리에 비하여 산출된 물성치는 기존의 간단한 방법과 큰 차이가 없는 경우가 많다. 특히, 복잡한 통계처리과정 중에 인위적인 개입이 가능한 문제와 통계적 합리성에 부합치 않는 자료처리과정은 중요한 문제라고 생각된다.

암반의 설계정수산정은 상당히 어려운 문제이기 때문에 필자도 명확한 해결책의 제시보다는 문제점만 지적하여 무책임함을 느끼고 있으나, 앞으로 다음과 같은 방향으로 개선해 나가야 할 것으로 생각한다.

1) 현장시험자료의 충실한 활용

암반의 변형계수 산정시 다른 연구자들이 제안한 다수의 경험식에 의하여 산출된 값들과 현장시험자료를 평균하는 경우가 있다. 특히, 근래 들어서 경험식의 수가 상당히 많아지므로써 대상암반의 특성이 가장 잘 반영된 시험자료의 중요도가 희석되는 사례가 많다. 현장시험자료가 절대적으로 부족한 경우에도 과업지역과 유사한 프로젝트에서 수행된 현장시험자료를 활용하는 방안을 적극적으로 고려할 필요가 있다.

2) 우리나라 지질특성에 맞는 경험식 작성

개별 프로젝트에서는 통계적으로 의미있는 수량의 현장시험이 곤란한 경우가 많고 또한 다

양한 암반조건에 대한 시험이 수행되지 못하는 경우가 많다. 따라서, 우리나라의 주요 지질 특성별 자료를 취합, 분석하여 지질조건이 다른 외국사례의 무분별한 적용을 지양할 필요가 있다.

3) 조사자료의 합리적인 통계처리

최근 턴키설계에서 적용하고 있는 통계적 기법은 웬만한 전문가들이 이해하기가 곤란할 정도로 난해하고 자연적 불확실성이 고려되지 않는 방법들이 적용되고 있다. 또한, 통계처리 과정들의 연계가 잘못되어 본래의 현장자료는 단순히 재처리과정 중의 자료로만 사용되는 경우가 많다.

기본적으로 자료의 통계처리 과정에는 현장 시험자료와 시험조건과의 민감도 분석이 선행되어 시험결과와 조건에 대한 주요 요소의 도출할 필요가 있다. 다음 과정으로는 도출된 요소들과 시험결과의 회귀분석을 수행하고 그 결과에 의하여 산출된 수치와 본래의 자료의 비교를 통한 공학적 판단이 필요하다. 예측식이 현장 시험자료를 평균적으로는 만족하고 있을 수 있으나, 암반조건이 양호하거나 불량한 일정 범위에서 과다 또는 과소평가를 할 수도 있다. 특히, 암반조건이 불량한 구간에서 물성치의 과소평가 여부는 필히 검토할 필요가 있다.