

측정된 터널변위에 의한 암반 변형계수의 결정

박재우 · 박은규 · 김교원*

경북대학교 지질학과

Determination of Deformation Modulus of Rock Mass with Measured Tunnel Displacement

Jae-Woo Park, Eungyu Park, and Gyo-Won Kim*

Department of Geology, Kyungpook National University

터널의 설계 시 변형계수, 포아송비, 내부마찰각, 점착력 등의 지반특성치가 이용되는데, 이 중 변형계수는 터널변위에 가장 큰 영향을 준다. 그러나 암반의 변형계수는 불연속면과 시료크기 등의 영향으로 시험으로 결정하기 매우 어렵기 때문에 주로 경험적인 방법에 의존하고 있다. 본 연구에서 현장조사, 실내시험, 및 시추조사를 통해 얻은 지반특성치에 근거하여 수치해석을 실시한 결과, 계산된 변위와 현장 계측치가 일치하지 않았다. 그래서 변형계수를 변화시키면서 반복 해석을 실시하여 변형계수와 터널변위의 상관성을 구하였으며, 상관관계식은 2 터널에서 얻어진 자료에 근거하여 적합성을 검증하였는데, 이 현장에서는 암반의 변형계수가 암석 탄성계수의 약 30~40%정도인 것으로 보인다.

주요어 : 수치해석, 상관성분석, 지반특성치, 천단침하, 터널변위

The major geotechnical parameters employed in tunnel design are deformation modulus, Poisson's ratio, friction angle, cohesion, etc. Among these parameters, the deformation modulus is the most significant parameter in tunnel deformation. However, determination of the modulus for rock mass by means of tests is very difficult due to factors affecting including discontinuities and sample size, etc. Thus input values used in the numerical analysis are generally determined by empirical method. A numerical analysis on tunnel was conducted with geotechnical parameters determined through the geological field mapping, laboratory tests, and evaluation of boring data, and some discrepancy between the computed result and tunnel displacements measured was found. Thus, further analyses by changing the deformation modulus of rock mass were performed to determine a relationship between the modulus and computed displacement. Data from two tunnel sites were used to verify the applicability of the proposed method and a correlative equation between deformation modulus and tunnel displacement is proposed. The deformation modulus of rock mass was around 30-40% of Young's modulus of intact rock in these cases.

Key words : numerical analysis, correlation analysis, geotechnical parameter, crown settlement, tunnel displacement

서 론

다양한 생성환경에 따라 서로 다른 지질조건을 갖추고 있는 지반의 특성은 쉽게 예측할 수 없는 가변성과 불확실성을 내포하고 있다. 터널을 굴착하는 데에는 지반의 조건에 따라 설계 및 시공방법이 결정되는데, 설계 단계에서 시공단계를 모사하기 위하여 추론 수치해석을 수행한다. 그러나 수치해석을 통한 터널 주변의 응력분

포나 변위 분석에는 정확한 지반정수를 산정하여 적용하여야 한다. 터널의 설계를 위하여 이용되는 주요 지반 정수로는 탄성계수(E), 포아송비(ν), 내부마찰각(Φ), 점착력(c), 초기측압계수(K_0), 단위중량(γ) 등이 있으며, 이러한 암반의 특성치는 실내시험만으로 산출하기가 어렵기 때문에 수치해석 시 입력치의 결정에 있어서 경험에 의존하는 경향이 있다.

터널 굴착은 지반상태에 따라 시공성과 경제성 및 환

*Corresponding author: gyokim@knu.ac.kr

경적인 요소를 감안하여 TBM(Tunnel Boring Machine), Shield공법, NATM(New Austrian Tunneling Method) 및 NMT(Norwegian Method of Tunneling) 등의 굴착 공법 및 이를 조합한 공법을 적용하거나 전단면, 반단면 등의 굴착 방식을 다양하게 적용하고 있으나, 지반은 압중, 압질 및 지질구조나 지표지질 등의 다양한 특성을 내포하고 있기 때문에 연약암반이나 토피가 낮은 지반 및 단층대와 같은 불균질 지반을 굴착 할 경우 터널 주변지반의 이완이나 막장자립성 저하로 인한 붕괴사태들이 보고되고 있다(Anderson, 1996; Valsov et al., 2001). 따라서 터널의 설계는 시공 전에 설계의 적절성과 안정성에 대해 충분히 검토해야 하며 불균질 지반이나 단층과 같은 연약대 분포 등을 확인하여야 하며, 또한 수치해석 등의 방법으로 터널의 거동을 사전에 분석하여야 한다.

국내에서도 터널의 현장계측 자료의 분석이나 내공변위나 천단침하의 특성과 지반거동에 대한 예측 분석 및 역해석 등에 대한 (송승곤 외, 2002; 문승백 외, 2001; 정형석외, 1998; 김영근 외, 1996; 김호영과 박의섭, 1993) 연구가 발표된 바 있다. 최상현과 조국환(2005)은 터널 주변 지반의 지반정수와 터널의 상대변위의 민감도 관계를 통하여 지반의 상태를 역해석할 수 있는 기법을 제안하였으며, 박연준 외(2004)는 터널막장 전방 지반 상태를 예측하기 위해 3차원 수치해석을 통한 막장전방에 가상의 연약대를 설정하고 변형성과 규모 및 방향성의 변화를 주어 내공변위에 대한 해석을 실시한 바 있다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 계측결과에 부합되는 지반특성치를 역으로 산출하였으며, 이를 이용하여 지반에 적합한 특성치 산정방법을 제시하였다.

연구 내용

본 연구지역은 현재 건설 중인 경부고속철도 제 00공구 00터널의 능골못, 내동방지 구간을 대상으로 하고 있다. 터널 주변 지반의 현장조사, 실내시험 및 시추조사 자료를 통해 얻은 지반조사 자료를 바탕으로 수치해석을 실시하였다. 또한 터널 변위에 대한 현장 계측자료를 이용하여 수치해석 결과와 비교분석하여 수치해석을 통하여 계측결과에 부합되는 지반 변형계수를 역으로 산출하였으며, 이를 이용한 역해석에 의해 암석의 일축압축강도와 지반 변형계수와의 상관관계식을 도출하였다.

연구지역의 터널개요

능골못 구간

두 지역의 저수지 중 파쇄대와 변질대가 넓게 분포하는 능골못 구간을 시추조사를 통해 확인한 결과 능골못은 토피고가 0.5D(D: 터널직경)인 안정성이 우려되는 천부 터널로 터널굴착 이전에 천단부 상반그라우팅이 시행되었고, 강관다단을 연속적으로 실시하였다. 해석영역은 터널 굴착 영향이 거의 없는 범위까지 확대하여 Fig. 1과 같이 좌우측으로는 터널 직경의 2.5배인 50 m 범위까지, 하부로도 50 m까지 모델링을 실시하였으며 상부는 저수지 바닥을 기준으로 하였다. 저수지 안에서 3공의 수상시추 조사를 통해 확인한 결과, 매우 불균질한 지반을 형성하는데 연약한 암반을 기준으로 해석단면을 상부로부터 층후를 토사층 1.0~7.0 m, 풍화암층 3.5~10.0 m, 연암층 3.0 m, 그 이하는 경암층으로 구분하였다.

능골못 구간 터널 막장의 주 기반암은 암회색 퇴적암인 셰일과 관입암인 염기성 암맥이며, 터널 천단부에서 저수지 바닥까지 7.2 m의 저토피고로 저수지 담수에 의한 포화상태의 지속으로 황갈색 풍화대가 분포한다. 관입암맥으로 인한 셰일과의 접촉부는 접촉파쇄대를 형성하며, 2개의 단층(N70W/68SW, N52E/60NW)이 발달한다. Table 1을 보면 총 RMR 평점은 22~60점으로 셰일과 접촉파쇄대의 암반은 불량~양호이며, 암맥이 분포하는 막장은 불량정도가 심하였다. 현장에서의 굴착 공사 당시 저수지의 물을 빼고 저수지 바닥에서 터널 상부구간을 그라우팅한 후 터널을 굴진하였으나, 막장에서 약간의 누수가 발생해 전반적으로 “젖음” 양상을 보

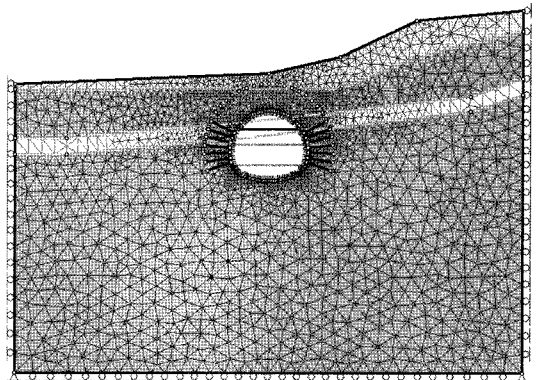


Fig. 1. Numerical model for Neungol reservoir.

Table 1. RMR value for rock mass around Neungol reservoir.

구분	점수	내용
암석강도	4~7	점재하강도 1~4MPa, 일축압축강도 25~100MPa
RQD(%)	13	50~75
절리간격	15	2.0~0.6m
절리면의	연속성	1~2
	간극	0~4
	거칠기	0~5
	충전물	0~4
상태	풍화도	1~5
	지하수 상태	0~10
방향성 보정	-12~-5	터널 축에 평행 굴진 45~90°, 주향이 터널과 수직(역경사 방향 굴진 45~90°)
RMR 평점		22~60점

였고, 그라우팅을 실시하지 않은 구간은 “지하수 흐름” 정도도 일부 나타났다.

내동방지 구간

내동방지 구간은 능골못과 동일한 세일층 지역이나 암질이 양호하며, 토피코가 4D이상으로써 비교적 안전한 터널굴착 구간이다. 보강은 록볼트 보강을 실시하였으며, 해석영역은 Fig. 2와 같이 좌우측으로 50 m 범위 까지, 하부로도 50 m까지 모델링을 실시하였고, 상부는 저수지 바닥을 기준으로 하였다. 시추조사를 기준으로 한 해석단면은 상부로부터 층후를 토사층 2.0~4.0 m, 풍화암층 8.0~10.5 m, 연암층 10.0 m, 그 이하는 경암층으

로 구분하였다.

내동방지 구간 터널막장의 분포암석은 열변질을 받아 약하게 혼펠스화된 암회색 세일과 이를 관입한 안산암이 분포한다. Table 2를 보면 총 RMR 평점은 51~81 점으로 수평층리에 가까운(N30~63E, 9~10SE) 박층의 층리가 발달하나 층리간 결합력이 양호하고 간극은 1.0~0.1 mm이하로 치밀한 양상을 보였다. 단층의 방위는 N18W/80NE로 약 6 m정도의 폭을 가지며 지하수는 세일 분포구간이 찌꺼기 상태이나 관입암의 접촉부구간에서 “젖음” 상태 내지 “흘러내림” 정도를 보였다.

현장 계측자료 분석

계측은 터널굴착 과정 중에 수행된 일상계측과 대표 계측을 통해서 실제로 지반의 변위정도와 지보 및 보조 공법의 적절성을 판단하고 안정성을 평가하는 목적으로 실시된다. Fig. 3은 두 저수지 구간의 터널 천단침하와 내공변위의 측정결과를 그래프로 도시한 것이다.

터널 굴착 초기에 변위속도가 빠르게 나타나고 굴착 15일 이후에는 전반적으로 서서히 수렴하는 양상을 보이며 막장으로부터 30 m 이후에 더 이상의 변화가 없는 것으로 보아 2D이상일 경우 변위가 수렴되는 것으로 판단된다. 전반적으로 상반 굴착 시에 변위량이 크고 상대적으로 하반 굴착 시에는 작게 나타났는데, 이는 상반과 하반의 굴착거리가 50 m이상 떨어진 상태에서 굴착이 진행되고 상반 굴착 후 지보재 설치로 지중변위가 수렴 단계에서 하반 굴착이 시행되는 결과로 판단된다. 계측 결과 능골못의 터널 굴착 시 최대천단침하량은 3.6 mm, 최대내공변위량은 4.6 mm이고 내동방지의 터널 굴착 시

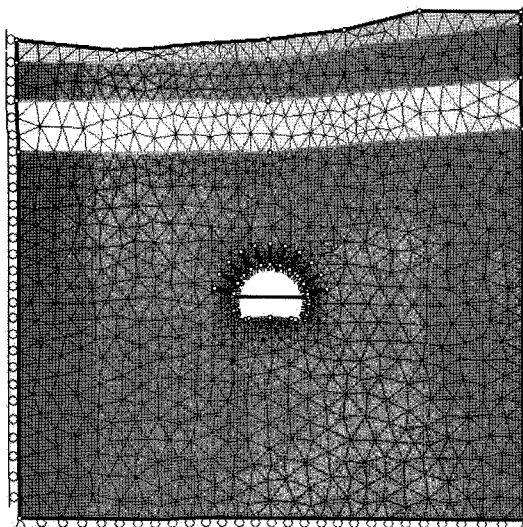


Fig. 2. Numerical model for Nedongbang reservoir.

Table 2. RMR value for rock mass around Nedongbang reservoir.

구분	점수	내용
암석강도	7~12	점재하강도 2~10MPa, 일축압축강도 50~250MPa
RQD(%)	17	75~90
절리간격	15	0.6~2.0m
절리면의	연속성	1~2
	간극	4~5
	거칠기	3~5
	충전물	2~4
상태	풍화도	3~6
	지하수 상태	4~15
방향성 보정	-5~0	주향이 터널방향과 수직 (경사방향 굴진 45~90°) 주향과 무관
RMR 평점	51~81점	

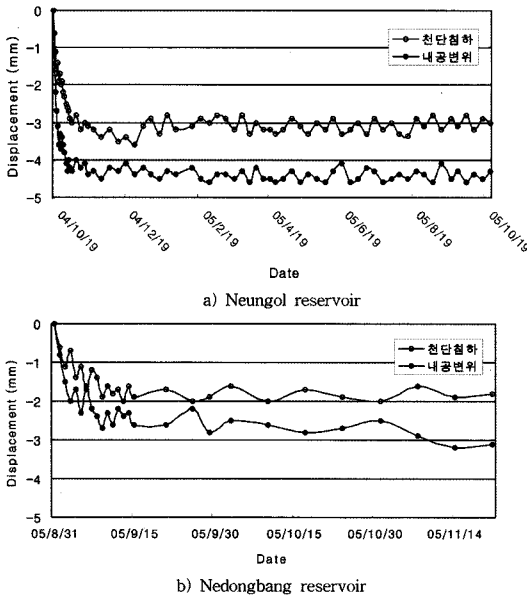


Fig. 3. Monitored tunnel displacements.

최대천단침하량은 2.0 mm, 최대 내공변위량은 3.1 mm로 나타났다.

계측값 보정

터널의 계측값의 경우 실제 계측기를 설치하여 변위

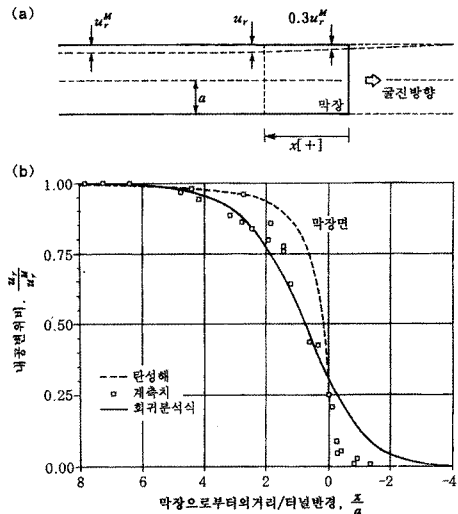


Fig. 4. Distance-displacement curve (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000).

를 측정하기 때문에 계측기 설치 이전에 발생한 변위를 측정할 수 없게 된다. 즉, 터널의 굴착 이전에 이미 변위가 시작되었기 때문인데, 이를 보정하기 위해 Fig. 4의 종단변위곡선을 이용하였다. Fig. 4에 의하면, 터널막장으로부터 약 2D전방에서부터 변위가 발생되기 시작하여 막장 후방 약 4D정도에서 변위는 수렴하는 것으

Table 3. Measured and expected true amount of tunnel displacement.

구분	능골못		내동방지	
	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)
계측값	3.6	4.6	2.0	3.1
예상 터널변위	5.1	6.6	2.9	4.4

로 나타나서 터널굴착 즉시 막장에서 이미 최종변위의 약 30% 가량이 발생된 것으로 볼 수 있다. 터널 굴착 시 막장에서의 30%변위가 이미 발생한 것을 감안하여 다음 식(1)을 통해 전체 터널 변위량을 실제 현장 계측치로 보정하였다.

$$\text{터널 변위량} = \text{계측값} \times 100/70 \quad (1)$$

터널의 지반특성치 산정

지반특성치 산정 개요

터널의 설계 및 시공 시 지반성질을 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다. 그러나 지반은 예측이 쉽지 않은 가변성과 불확실성을 내포하고 있으므로 지반의 상태를 대표하는 지반정수를 설계단계에서 파악하기 어려운 경우가 많다. 일반적으로 터널 굴착에서는 시공 중에 터널 내 현장계측을 수행하여 설계 초기 설정하였던 지반정수를 보정하고, 이 결과를 차후 시공에 반영하고 있다(이인모 외, 2005). 터널의 수치해석에 적용되는 지반정수에는 변형계수(D), 포아송비(ν), 점착력(c), 내부마찰각(Φ), 단위중량(γ) 등이 있으며, 이인모 외(2005)의 민감도 분석에 따르면 변형계수와 축압계수가 터널의 변위에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이들 두 지반정수가 터널 변위에 끼치는 영향을 분석하였다.

기존 연구자료 분석을 통한 초기값 설정

연구지역의 경우 경상계 퇴적암이 노출되어 있으므로 해석 입력치는 동일한 경상계 퇴적암인 현풍-구미 간 터널에 적용한 기존의 설계자료(건설교통부 도로설계편람, 1998)를 참고로 하여 지반정수의 초기값을 설정하였다.

단, 토사층은 추가조사 시에 수행된 표준관입시험의 $N=12$ 를 근거로 서울시 지반조사편람(1996)을 참고하여 입력치를 결정하였다. Table 4는 현풍-구미 간 터널에 적용한 기존의 설계 자료를 참고로 하여 지반정수의 초기값을 설정한 것이다. 또한 축압계수는 대구지하철 설계시 측정된 경상계 퇴적층의 대푯값인 1.5를 적용하였다.

변형계수와 변위의 상관성을 이용한 지반특성치 산정

Table 4의 지반정수를 이용하여 수치해석을 실시하였을 때 그 결과는 Fig. 5의 100%에 해당되는 값과 같이 실제 현장 계측치와 상당한 차이를 보인다. 따라서 이 값을 보정하기 위해 터널 변위에 큰 영향을 끼치는 변형계수를 이용하여 현장 계측치에 근사한 값을 도출하였다. Fig. 5와 같이 초기치를 80, 60, 40 및 20%로 감소시키면서 반복해서 해석을 실시하였다.

두 연구지역에 대한 그래프를 분석한 결과 능골못의 경우 D/D_0 값을 39%로 적용하였을 때, 내동방지의 경우 D/D_0 값이 37%일 때 계측값과 가장 근사한 값을 도출할 수 있었다. 이 값을 이용하여 다시 해석을 실시한 결과 산출된 천단침하 및 내공변위값이 Table 5와 같이 예상치와 매우 근사하였다 즉, 경상계 퇴적암 지역의 적절한 변형계수는 설계시 적용하던 경험치의 약 30~39% 정도로 감소시켜 적용함이 타당한 것으로 판단된다.

암반특성의 상관분석을 이용한 지반특성치 산정

그 동안 국내에서 수행된 많은 실내암석시험에 근거하여, 김교원과 김수정(2006)은 암종별 특성치 분포양상에 대하여 연구한 바가 있는데, 일축압축강도(qu)나 점착력(c), 내부마찰각(Φ), 인장력(st), 탄성계수(E) 등의 상관관계를 분석하였다. 암종별로 일축압축강도와 탄성계수의 상관성을 84% 신뢰도에서 상관관계식을 도출한 결

Table 4. Properties used in numerical analysis.

구분	단위중량 (t/m^3)	변형계수 D(t)	포아송비	내부마찰각 ($^\circ$)	점착력 c(t/m^2)
토사층	1.7	3,000	0.4	30	5
풍화암층	2.3	100,000	0.3	30	15
연암층	2.5	200,000	0.25	35	25
경암층	2.7	2,000,000	0.2	45	45
그라우팅	2.5	2,000,000	0.25	35	60
Shot-crete	soft	2.3			500,000
	hard	2.3			1,500,000
강관다단					310,000
록볼트					21,000,000
축압계수 (K_0)					1.5 적용

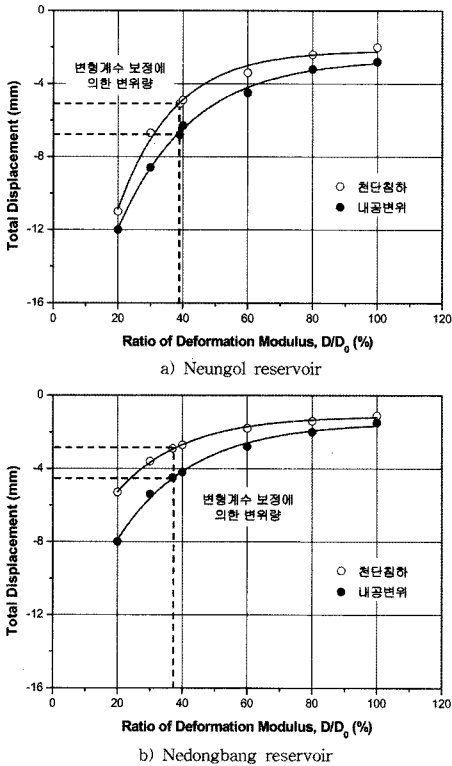


Fig. 5. Correlation between normalized deformation modulus and total displacement.

과는 Fig. 6과 같이 상관관계를 보인다. 즉, 안전율을 고려하는 경우 84% 신뢰도 관계식을 이용하여 암종별로 일축압축강도로부터 산출된 탄성계수를 지반구조물 설계시 참고자료로 활용할 수 있을 것이다(김교원과 김수정, 2006).

다음에 제안된 식은 세일층의 일축압축강도와 탄성계수와의 상관관계식으로 본 연구지역의 세일층에 적합하다고 사료되어 이를 이용하여 탄성계수를 도출하여 Table 6에 정리하였다.

$$E = 100.84 \log qu + 2.66 \quad (2)$$

단, E: 탄성계수 qu: 일축압축강도 단위: kg/cm²
여기에 제시된 암석의 탄성계수는 무결암에 대한 것

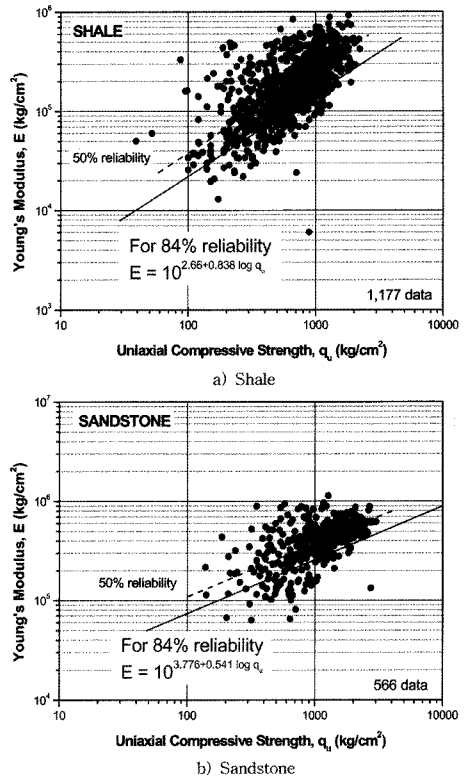


Fig. 6. Correlation between uniaxial compressive strength and Young's modulus (Gyo-Won Kim and Su-Jeong Kim, 2006).

이기 때문에 불연속면이 발달된 현장 암반의 변형계수로 그대로 적용할 수는 없다. 따라서 이 값을 초기값으로 하여 변형계수를 변화시키면서 수치해석을 수행하여 계산된 변위값을 보정된 터널 변위와 비교하였다. Fig. 7에 제시된 그래프는 일축압축강도에 따른 변형계수를 초기값으로 각 지층의 변형계수를 1로 잡았을 때 그 비율의 변화에 따른 변위량을 나타낸 것이다. 그 결과 Fig. 7과 같이 능골못의 경우 D/D₀값을 37%로 적용하였을 때 5.1 mm의 천단침하량, 35%로 적용하였을 때 6.6 mm의 내공변위량을 구할 수 있었다. 따라서 두 값의 중간값인 36%를 적용한 변위값을 도출하였다. 내동방지의 경우 D/D₀값이 27.5%일 때 계측값과 일치하였

Table 5. Comparison of computed values with expected true displacements.

구분	능골못		내동방지	
	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)
보정된 터널변위	5.1	6.6	2.9	4.4
보정된 변형계수에 의한 터널변위	5.1	6.8	2.9	4.5

Table 6. Young's modulus determined by empirical equation with uniaxial compressive strength.

구분	능골못		내동방지	
	일축압축강도 (kg/cm ²)	산출된탄성계수 (kg/cm ²)	일축압축강도 (kg/cm ²)	산출된 탄성계수 (kg/cm ²)
풍화암	200	40,000	500	85,000
연 암	800	125,000	1,200	176,000
경 암	1,600	225,000	2,000	271,000

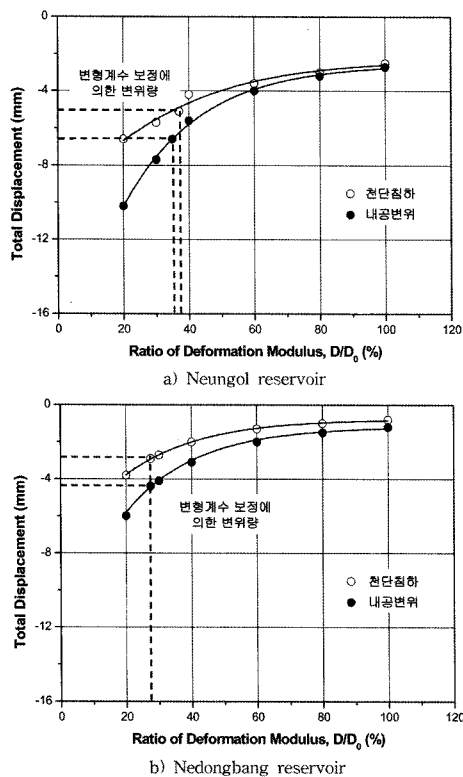


Fig. 7. Correlation between normalized deformation modulus and total displacement.

다. 다음 Table 7은 보정된 현장 계측치와 변형계수를 변형시킨 보정값을 나타낸 것이다.

이를 근거로 볼 때 당 현장의 경우 암석 탄성계수의 약 30%정도가 현장암반의 변형계수로 볼 수 있기 때문에 식(2)는 다음과 같이 수정한 후 암석의 일축압축강도를 이용하여 암반의 변형계수를 추정할 수 있을 것으로

사료된다. 위에서 제시된 보정된 변형계수를 역산으로 식(2)인 세일층 암석의 상관관계식에 대입하면, 다음과 같은 식(3)을 얻을 수 있다.

$$D = 10^{0.84 \log qu + 2.1} \tag{3}$$

단, D: 변형계수 qu: 일축압축강도 단위: kg/cm²

위 식(3)인 지반의 상관관계식을 이용하여 계산된 변형계수의 경우 능골못에서는 천단침하가 5.3 mm, 내공변위가 6.8 mm로 현장 계측치와 다소 차이를 보이지만, 내동방지에서는 천단침하가 2.9 mm, 내공변위가 4.4 mm로 현장 계측치와 일치한다.

토 의

수치해석 입력물성치

수치해석에 사용된 지반특성치는 변형계수와 변위의 상관관계에 의해 보정된 값과 암반특성의 상관성 분석에 의해 보정된 값이다. 변형계수를 제외한 포아송비(ν), 점착력(c), 내부마찰각(Φ), 단위중량(γ) 등의 입력물성치에 현풍-구미 간 터널에 적용한 지반정수의 초기값을 동일하게 적용하였다. 앞서 언급한 두 조건으로 보정된 변형계수의 혼란을 막기 위해 전자를 변형계수 E_A 라 하고, 후자를 변형계수 E_B 라 한다. 또한 이들 변형계수를 수치해석에 적용하여 산출한 터널 변위도 각각 변위 A와 변위 B라 한다.

a) 변형계수 E_A - 변형계수와 변위의 상관관계에 의한 보정값

현풍-구미 간 터널에 적용한 지반정수의 초기값을 이

Table 7. Comparison of computed values with expected true displacements.

구분	능골못		내동방지	
	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)
보정된 터널변위	5.1	6.6	2.9	4.4
보정된 변형계수에 의한 터널변위	5.3	6.8	2.9	4.4

용하여 변형계수와 터널 변위의 상관관계를 분석하였고, 이를 이용하여 변형계수를 보정하였다. 능골못의 경우 초기변형계수의 39%, 내동방지의 경우 초기변형계수의 37%인 보정값을 수치해석의 입력물성치로 적용하였다.

b) 변형계수 E_B - 암반특성의 상관성 분석에 의한 보정값

세일층의 상관관계식을 이용하여 연구지역의 지반에 적합한 변형계수를 도출하고, 이를 역해석하여 지반에 적용할 수 있는 일축압축강도와 변형계수의 상관관계식을 도출하였다. 또한 상관관계식으로부터 산출된 암석 탄성계수의 약 30%정도인 변형계수를 수치해석의 입력물성치로 사용하였다.

현장 계측치와 굴착단계별 수치해석 결과비교

다음 Fig. 8과 Fig. 9는 능골못과 내동방지의 수치해석 결과와 현장 계측치를 굴착단계별로 비교한 그래프이다. 능골못 구간은 다단분할 굴착공법이 적용되어 8단계로 수치해석이 실시되었고, 내동방지 구간은 상·하

반 분할 굴착공법을 적용하여 5단계로 수치해석을 수행하였다.

능골못의 천단침하는 굴착단계별로 -3.2~5.3 mm로 터널 변위 A값과 B값이 거의 일치하며 현장 계측치도 수치해석 결과와 유사한 패턴을 보였다. 터널 내공변위는 -1.0~6.8 mm로 굴착단계에 따라 큰 변위차를 보이거나 수치해석 결과와 현장 계측치의 패턴이 거의 일치함을 보였다.

내동방지의 천단침하는 굴착단계별로 -2.5~2.9 mm로 큰 변위 차는 보이지 않지만 터널 변위 A값과 B값이 일치하며 현장 계측치도 유사한 패턴을 보였다. 터널 내공변위는 -1~4.4 mm의 굴착단계별 변위량을 보였고, 수치해석 결과와 현장 계측치가 거의 일치하는 그래프 형태를 보였다.

결론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 계측결과에 부합되는 지반특성치를 역으로 산출하였으며, 이를 이용하여

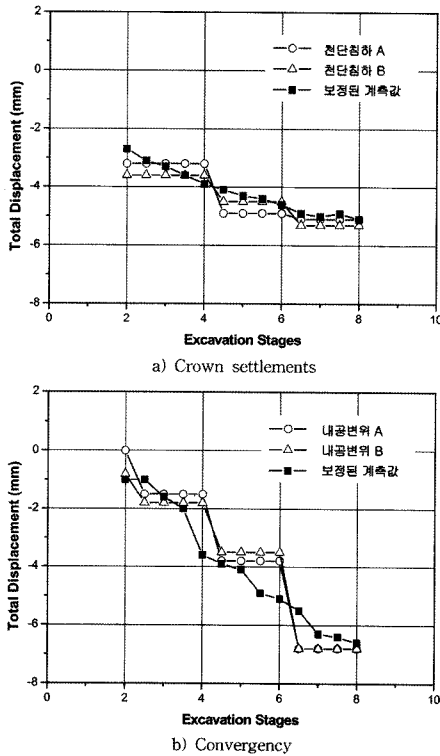


Fig. 8. Displacement at each stage for tunnel under Neungol reservoir.

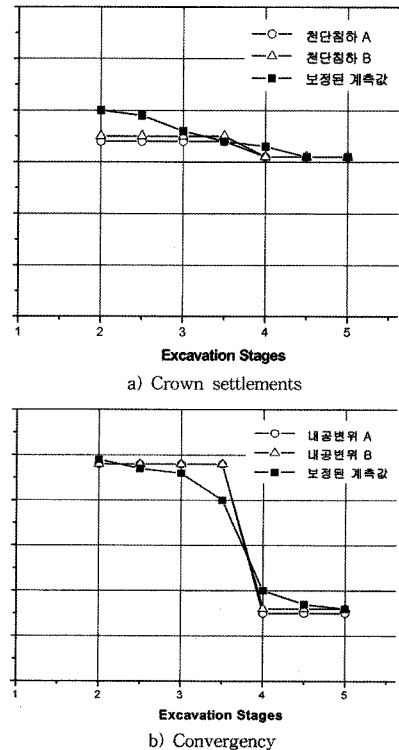


Fig. 9. Displacement at each stage for tunnel under Nedongbang reservoir.

지반에 적합한 특성치 산정방법을 제시하였다.

연구지역은 경부고속철도 제 00공구 00터널의 능골못과 내동방지 구간으로 세일을 기반암으로 안산암질 암맥이 관입하고 있으며, 그 위로 4기 퇴적층이 분포하고 있다. 터널 내에서 관측된 세일층에는 관입 접촉부 파쇄대가 발달하며, 단층대가 존재하여 투수성이 불량한 암반이 분포하는 것으로 판단된다. 이러한 터널 주변 지반의 현장조사, 실내시험, 및 시추조사 자료를 통해 얻은 지반조사 자료를 바탕으로 수치해석을 실시하였으며, 터널 변위에 대한 현장 계측자료를 이용하여 수치해석 자료와 비교분석을 실시하였다.

현풍-구미 간 터널에 적용한 기존의 설계 자료를 참고로 하여 지반정수의 초기값을 설정하고 지반 변형계수를 이용하여 터널 변위와의 상관관계를 분석하였다. 각 지반의 변형계수 D 를 1로 두었을 때 D/D_0 값을 변화시켜가며, 단계별로 이에 따른 터널 변위량을 측정하였다. 능골못의 경우 천단침하 $-2.0\sim-11.0\text{mm}$, 내공변위 $-2.8\sim-12.0\text{mm}$ 로 그 값이 커지며, 내동방지의 경우 천단침하 $-1.1\sim-5.3\text{mm}$, 내공변위 $-1.5\sim-8.0\text{mm}$ 로 변화됨을 알 수 있다. 이때 능골못은 D/D_0 값이 39%, 내동방지는 37%일 때 현장 계측치에 가장 근접한 값을 구할 수 있었다.

암반특성의 상관성 분석을 이용하여 암석 탄성계수를 산정하고, 이를 이용하여 지반에 적용할 수 있는 일축압축강도와 변형계수의 상관관계식을 도출하였다. 암석에 대한 상관관계식을 이용하여 초기값을 설정하고, 변형계수와 터널 변위의 상관관계를 이용하여 지반에 적합한 일축압축강도와 변형계수의 상관관계식을 도출하였다. 이렇게 구해진 식을 역해석하여 지반에 적합한 변형계수를 산출해보면, 암석 탄성계수의 약 30%정도인 값에서 현장암반의 변형계수를 도출할 수 있었다.

앞에서 제시한 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서는 서로 다른 지반의 두 지역에 대한 역해석 결과 다소의 오차는 있을 수 있으나 그 오차 범위가 1~2mm로 이러한 차이는 계측기 설치과정에서의 오차 및 계측과정에서의 오차 등을 고려한다면 미미한 것으로 판단된다. 현장 계측자료를 바탕으로 지반특성치 산정방법을 제시하였으나 본 지반특성치 산정방법의 폭 넓은 검증을 위해서는 좀 더 다양한 지반에서의 현장 계측자료를 활용한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술

평가원에서 위탁 시행한 2007년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: C104A1010001-04A0201-00130)의 일환으로 수행되었습니다. 또한 본 연구를 위하여 관련 자료를 제공해준 (주)대림산업에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 1998, 도로설계편람, 건설교통부, pp. 1,820.
- 김교원, 김수정, 2006, 한반도 암종별 공학적 특성의 상관성 분석, 대한지질공학회, Vol. 16, No. 1, pp. 59~68.
- 김영근, 장정범, 정한중, 1996, 경암지반 NATM 터널에서 암반분류 및 계측에 의한 최적지보공 선정에 관한 연구, 터널과 지하공간 6.2, 한국암반공학회지, pp. 197~208.
- 김호영, 박의섭, 1993, 터널 내공변위의 이론과 계측결과 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 3, pp. 80~95.
- 문승백, 양형식, 송승곤, 전양수, 한광창, 2001, 천층 광폭터널의 내공변위 및 침하거동특성 예측을 위한 수치해석적 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 11, No. 1, pp. 20~29.
- 박연준, 유광호, 송한찬, 김기선, 이대혁, 2004, 3차원 수치해석을 이용한 터널막장 전방 지반 상태의 예측, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, pp. 440~449.
- 한국지반공학회, 1996, 지반조사편람, 서울특별시.
- 송승곤, 양형식, 임성식, 정소걸, 2002, 현장계측치를 이용한 경암지반 내 터널의 최종 변위량 예측, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 12, No. 2, pp. 99~106.
- 이인모, 조국환, 최충식, 최민광, 이근하, 2005, 확장 Bayesian 방법과 상대변위를 이용한 터널 역해석 기법, 한국지반공학회, 한국지반공학회 논문집, Vol. 21, No. 3, pp. 99~108.
- 정형식, 김성환, 이상동, 김낙영, 1998, 통계적 방법에 의한 터널 최종변위량 예측에 관한 연구, 한국지반공학회, 춘계학술발표 논문집, pp. 347~356.
- 최상현, 조국환, 2005, 상대변위를 이용한 지반정수 인식, 한국철도학회, 추계학술발표 논문집, Vol. 2005, pp. 1~6.
- Anderson, J.M., 1996, Reducing Risk and Improving safety with Particular Reference to NATM, Proc. North American Tunnelling'96, Balkema, pp. 453~458.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000, Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hock-Brown failure criterion, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 2, pp. 187~213.
- Valsov, S.N., Makovsky, L.V., Merkin, V.E., 2001, Accidents in transportation and Subway Tunnels, Elex-KM Publ. Moscow.

2007년 11월 17일 원고접수, 2007년 12월 14일 게재승인

박재우

경북대학교 지질학과

702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5354

Fax: 053-950-5362

E-mail: jess-77@hanmail.net

김교원

경북대학교 지질학과

702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5357

Fax: 053-950-5362

E-mail: gyokim@knu.ac.kr

박은규

경북대학교 지질학과

702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5354

Fax: 053-950-5362

E-mail: egpark@knu.ac.kr