

절리발달 암반터널의 불연속체해석과 연속체해석에 관한 고찰

A Study on Discontinuum Analysis and Continuum Analysis of Tunnels in Jointed Rock Mass

조선규
Cho, Sun-kyu

김시격
Kim, Si-kyeok

김도훈
Kim, Do-loon

ABSTRACT

Numerical methods to estimate behaviors of jointed rock mass can be roughly divided into two method : discontinuous model and continuum model. Generally, distinct element method (DEM) is applied in discontinuous model, and finite element method (FEM) or finite difference method (FDM) is utilized in continuum model. To predict a behavior of discontinuous model by DEM, it is essential to understand characteristics of joints developed in rock mass through field tests. However, results of field tests can not provide full information about rock mass because field tests is conducted in limited area. In this paper, discontinuous analysis by UDEC and continuous analysis by FLAC is utilized to estimate a behavior of a tunnel in jointed rock mass. For including discontinuous analysis in continuous analysis, joints in rock mass is considered by reducing rock mass properties obtained by RMR and decreasing shear strength of rock mass. By comparing and revising two analysis results, analysis results similar with practical behavior of a tunnel can be induced and appropriate support system is decided.

1. 서론

본 논문에서는 지반조사가 불확실한 절리암반 터널의 설계시 불연속체 해석과 불연속체면을 고려한 연속체해석을 수행하여 이를 보정하고 비교 분석함으로써 실제 거동과 유사한 결과를 도출하고 절리 암반터널의 보정계수를 파악하기 위함이다.

개별요소법인 UDEC을 이용한 절리암반 터널의 해석으로 암물리의 물성과 절리의 물성을 이용하여 절리면 모델 해석을 수행하여 절리 암반 터널의 거동과 안정성을 파악할 수 있는 해석 결과치를 산출하고, 지반조사의 결과물 중의 하나인 RMR(Rock Mass Rating)에 의해 경험적으로부터 산출된 값에 의한 불연속면이 고려된 연속체 해석을 수행하여 암반터널의 결과치 산출하여 이를 개별요소법의 결과치와 비교하여 연속체 해석의 적정성을 파악한다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원

** 용마엔지니어링 상무, 비회원

*** 용마엔지니어링 기술연구원, 비회원

“안전율은 파괴를 막을 수 있는 최소의 전단강도와 실제 지반의 전단강도의 비로 정의된다. (Bishop, 1955)”, “안전율은 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 낮은 값이 된다. (Duncan, 1996)”에서 보여진 것과 같이 연속체해석의 절리면 모델 해석시 Increment Search 방법에 의한 역해석 실시하여 점차적으로 개별요소법의 불연속체해석과 RMR 값에 의한 연속체 해석의 결과치와 유사한 해석 결과치를 가지게 하는 암반 보정 계수를 산출하여 불확실한 지반의 절리발달사항을 연속체 모델에 적용하고 이 보정계수를 절리 암반 터널의 안전율로 활용한다.

절리 암반의 해석시에는 개별요소법의 암반블럭과 연속체 암반블럭을 Mohr-Coulomb Model을 이용한 Deformable Block으로 적용함으로써 각 해석의 비교 분석이 가능하게 하며, 개별요소법의 절리면 모델도 Mohr-Coulomb 기준 절리면 모델을 이용하여 해석의 일관성을 유지하도록 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 Mohr-Coulomb Model의 정의

탄소성 구성 모델에서는 재료의 응력 수준이 항복점에 도달하기 전까지의 거동은 탄성 모델로서 묘사되나, 항복점에 도달한 이후의 거동은 소성 거동을 따른다고 가정, Mohr-Coulomb 항복기준(Failure Criteria)에 따르면 흙의 전단강도는 항복면에서의 연직응력이 증가함에 따라 증가한다고 가정, 팽창각을 상수로 취급하며, 전단강도식은 다음식으로 $\tau = \sigma \tan \phi + C$ 표현된다.

2.2 RMR에 의한 수정된 암반강도 적용

암반의 변형계수(Deformation Modulus)는 모든 수치해석에서 매우 중요한 변수로 적용된다. 본 해석에서는 암반 분류 방법중 가장 보편적으로 활용되고 있는 RMR 분류법에 따른 Bieniawski와 Serafim & Pereira에 의해서 제안된 Bieniawski의 $E = 2 RMR - 100$ (GPa)과 Serafim & Pereira의 $E = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$ (GPa) 경험식에 의해 절리를 고려한 변형계수를 산출하였다.

점착력과 내부마찰각은 Trueman(1988)이 RMR을 바탕으로 제안한 경험식을 사용하여 산출하였으며, 점착력은 $C_m = 0.25_{exp} (0.05 RMR)$ (Mpa), 마찰각은 $\phi_m = 0.5 RMR + 5$ (Degree)인 경험식을 이용하여 산출하였다

2.3 전단강도 감소기법에 의한 역해석

Flac 해석 모델의 암반에 절리로 인한 암반 강도 저하를 적용시키기 위해 전단강도 감소 기법을 이용하여 암반의 물성치인 점착력(c)과 내부 마찰각(ϕ)을 보정계수인 F^{trial} 를 이용한 $C^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} C$, $\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi\right)$ 의 식으로 나누어 전단강도를 감소시킴으로써 암반 강도 저하를 구할 수 있다.

3. 해석 개요

3.1 암반분류 및 절리면 물성치 개요

본 해석에서는 UDEC의 물성은 보통암인 경우를 적용하였다. 절리 발달구간의 암반 터널의 거동을 파악함에 있어 보통암이 그 외의 암반에 비하여 균착에 따른 절리의 영향을 잘 표현할 수 있기 때문이다. 풍화암의 경우 절리의 발달보다는 굴곡시 암반의 파쇄에 대한 영향이 크고 RMR이 60이상인 경암과 극경암의 경우에는 절리의 발달이 적은 것으로 사료된다. 암반 분류 물성과 절리면 물성치는 Mohr-Coulomb의 물성치를 적용하였다.

FLAC 해석에서는 UDEC의 암반 분류와 동일한 매수에 보통암의 경우의 암반 분류를 형성하여 암반을 RMR 구분하였을 때 보통암이 속하는 40~60 사이의 값을 이용하여 해석에 적용하였다. 암반의 특성을 가지는 RMR값으로 경험식에서 나온 물성으로 해석을 수행하였고, 진단강도감소기법은 Increment Search 방법에 의한 역해석을 실시하였다.

3.2 암반분류 및 절리면 적용 물성치

UDEC에서의 절리면 물성은 Mohr-Coulomb의 물성과 Barton-Bandis의 물성을 적용하는 두가지의 방법이 있으나, 논문에서는 모델의 통일성을 기하기 위하여 절리면 물성을 Mohr-Coulomb의 물성치를 적용하였다. 논문에서 석용 물성은 자료의 정확성을 위하여 실제 설계의 지반 조사 및 분석(경상남도 양산시역)에서 산출된 암반의 물성과 절리면의 물성을 적용하였다.

도표 1. 암반 터널 FLAC 해석 물성치

구분	단위중량 (ton/m ³)	변형계수 (GPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)	포아손비	RMR
보통암	2.5	8.00	2.00	43	0.24	40~60

본 논문에서 절리면 물성치 (Mohr-Coulomb Model) 적용을 위해서 Barton의 경험식을 이용하여 Mohr-Coulomb Model 절리면 해석에 필요한 강도정수인 C, ϕ 값을 산출하였다.

도표 2. 절리 입력 특성치

구분	JRC ₀	JCS ₀ (MPa)	Kn (GPa)	Ks (GPa)	Lo	ϕ_r (°)	σ_c / JCS_0	σ_c (MPa)	σ_n (MPa)
J1	8.5	73	37.1	3.24	0.1	30	1.8	132	0.3
J2	7.3	73	29.7	2.35	0.1	30	1.8	132	0.3
J3	5.7	73	20.6	1.31	0.1	30	1.8	132	0.3

Mohr-Coulomb의 절리면 모델을 점착력과 내부마찰각의 값이 필요하므로 이는 Barton이 제안한 아래에 나열된 경험식으로부터 구한다.

$$\text{전단응력}(\tau)\text{산출} \rightarrow \tau = \sigma_n \tan [JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} \text{ 계산} \rightarrow \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} &= \tan [JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r] \\ &- \frac{\pi}{180} \frac{JRC}{\ln 10} [\tan^2 [JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r] + 1] \end{aligned}$$

내부마찰각(ϕ) 산출 $\blacktriangleright \phi = \arctan\left(-\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}\right)$

점착력(c) $\blacktriangleright C = \tau - \sigma_n \tan \phi$

도표 3. Barton의 경험식에서 구한 Mohr-Coulomb의 절리 입력 특성치

구 분	JRC _o	JCS _o (MPa)	Kn (GPa)	Ks (GPa)	점착력 C (MPa)	내부마찰각 ϕ (°)
J1	8.5	73	37.1	3.24	0.0730	44
J2	7.3	73	29.7	2.35	0.0583	42
J3	5.7	73	20.6	1.31	0.0467	39

3.3 RMR에 의한 수정된 암반 강도 산정

경험식의 물성을 산출은 UDEC의 암반 블록인 보통암의 RMR 범위인 40~60 사이에서 RMR 값들을 변화 시켜 적용하며 해석을 수행하여 그 적정성을 검토하였다.

적용된 경험식은 국내외에서 가장 널리 적용되는 Bieniawski와 Serafim & Pereira의 식과 Trueman의 식을 적용하였다.

도표 4. RMR에 의한 물성치 정리

구 분	RMR	단위중량 (ton/m ³)	변형 계 수 (GPa)	점 착 력 (MPa)	내부마찰각 (°)	포아손비
보통암	41	2.5	5.96	1.94	25.5	0.24
보통암	45	2.5	7.50	2.37	27.5	0.24
보통암	50	2.5	10.00	3.05	30.0	0.24
보통암	55	2.5	10.00	3.91	32.5	0.24
보통암	60	2.5	20.00	5.02	35.0	0.24

3.4 전단강도 감소기법의 물성치 산정

기본 암반의 물성치를 전단강도 감소 기법에 의한 보정계수에 의하여 이를 수정하여 해석을 수행하였고, 보통암의 점착력과 내부 마찰각의 변화는 아래에 제시한 예제들(표8)과 같이 보정계수에 의해 수정되었다.

도표 5. F^{trial} 에 따른 수정된 보통암의 점착력과 내부 마찰각의 계산에

구 분	$C^{\text{trial}} = \frac{1}{F^{\text{trial}}} 20$	$\phi^{\text{trial}} = \arctan\left(\frac{1}{F^{\text{trial}}} \tan 43\right)$
$F^{\text{trial}} = 1.0$	2.00 MPa	43.000
$F^{\text{trial}} = 1.5$	1.33 MPa	31.868
$F^{\text{trial}} = 2.0$	1.00 MPa	24.998

4. 해석결과

4.1 UDEC Mohr-coulomb 절리 Model 해석결과

절리는 주절리군을 세가지로 구분하고 이 절리를 수평면과 약 60, 70, 300. 정도로 가정하였고, 굴착방향에 따라 영향을 미칠 수 있는 절리면의 방향에 대해서는 고려하지 못하였다.

터널대공변위는 천단변위 2.212mm이고, 측변변위의 경우 모두 터널안쪽으로 발생하였으며, 터널의 좌우측변위는 각각 1.318mm, 1.187mm로 산정되었다.

도표 6. UDEC의 슛크리트 압축력

구 분	해석 결과	허 용 치	비 고
최대 압축응력	0.341 MPa	0.84 MPa	안 정
최대 인장응력	-	0.006 MPa	안 정
최대 볼록부 축력	0.015 MPa	0.009 MPa	안 정

4.2 RMR에 의한 암반강도 FLAC 해석결과

41, 45, 50, 55, 60의 RMR값을 경험식에 의해 해석 물성치를 산출하여 해석을 수행한 결과는 다음 그림과 같이 나타난다.

도표 7. RMR에 따른 FLAC의 변위 및 슛크리트 압축응력

RMR 값	천단부 변위	압축응력	비 고
41	2.672 mm	0.411 MPa	
45	1.800 mm	0.339 MPa	UDEC와 유사한 결과
50	1.179 mm	0.215 MPa	

해석 결과 RMR 값이 45인 때 UDEC의 천단부 변위 2.212 mm와 슛크리트 압축응력 0.341 MPa 가까운 결과가 도출되었다. 보통암의 RMR 평균치인 50의 연속체 해석결과가 UDEC의 해석결과와 차이가 보인 것은 절리가 발달한 암반의 RMR 값이 평균치인 50보다 작은 RMR 값을 가짐을 보여준다고 사료된다. 본 논문에서 적용한 암반의 실제 지반조사의 결과에서도 보통암의 RMR값이 45로 도출된 것은 이를 뒷받침하는 자료라 볼수 있다.

4.3 천단 강도 감소법에 따른 FLAC 해석결과

FLAC 해석결과에서 F^{stail} 값이 1.48에서 UDEC의 슛크리트 압축강도 0.341 MPa와 천단부 변위 2.121 mm에 그 값들이 수렴함을 알 수 있다.

도표 8. 보정계수에 따른 슛크리트 응력과 변위의 변화

구 분	스�크리트 압축응력	천단부 변위	구 분	스�크리트 압축응력	천단부 변위
$F^{stail} = 1.42$	0.319Mpa	1.886mm	$F^{stail} = 1.46$	0.333Mpa	1.965mm
$F^{stail} = 1.43$	0.324Mpa	1.910mm	$F^{stail} = 1.47$	0.334Mpa	1.986mm
$F^{stail} = 1.44$	0.325Mpa	1.925mm	$F^{stail} = 1.48$	0.341Mpa	2.003mm
$F^{stail} = 1.45$	0.332Mpa	1.946mm	$F^{stail} = 1.49$	0.348Mpa	2.025mm

5. 해석결과 분석 및 결론

터널 안전성 검토에서 널리 활용되고 있는 연속체 모델기법인 FLAC해석이 절리가 많이 발달된 암반에서는 신뢰성이 부족한 것으로 평가되어 개별요소법에 의한 불연속체 모델 기법을 활용하고 있으나, UDEC에 의한 해석은 실제거동에 유사한 Parameter를 구하기 위해서는 정밀한 지반조사 및 분석이 요구된다. 경제성, 환경문제 및 민원 등으로 인하여 설계단계에서 정밀 조사 및 분석이 곤란할 경우 비교적 간단한 물성치를 구할 수 있는 연속체 해석 기법으로 불연속체 거동을 모사할 수 있는 지반조건을 범위를 해석하고, 연구한 결론은 다음과 같다.

1) 각각의 해석에서 나온 최종 전단부 변위는 불연속체 UDEC 해석에서 2.121 mm, RMR의 FLAC 해석에서 1.800 mm, 전단강도감소의 FLAC 해석에서 2.003mm 값이 도출되었다. 모든 값이 안정측에 포함되었으나, 개별요소법의 UDEC 절리면 모델과 RMR에서 도출된 물성치에 따른 해석, 전단강도 감소기법에 의한 해석에서 조금의 변위 차이가 있으나, 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

2) 응력의 경우에서는 슛크리드의 압축응력이 모든 해석에서 안정한 범위에서 나타났으며, 개별요소법인 UDEC해석과의 비교에서는 RMR값이 45일때의 해석에서는 0.39 %, 전단강도 감소기법에서는 0.19 %의 차이를 보였다. 두 모델의 비교에서는 압축 응력이 0.59 %의 차이가 남을 알 수 있었다.

3) 본 논문의 해석 결과와 같이 보통암에서 절리군이 발달된 불연속체의 보통암의 RMR값인 40~60의 평균적인 50이하인 값에서 유사한 거동을 보이므로 지반조사가 충분하지 못한 지반의 절리암반터널의 해석시 해석 암반의 RMR 평균치보다 낮은 값의 범위인 40~50 사이의 값을 사용하여 해석에 적용하면 유사한 결과를 암반의 거동을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4) 전단감소기법에 의한 보정계수는 현재 행하고 있는 절리암반터널의 해석이 여러 다른 절리사면의 해석과 다르게 터널 거동의 안전성을 평가하는데 사용되는 제한적인 사용에서 터널의 안전율을 판단하는 해석방법으로 사용될 수 있음을 보인다. 이는 여러 다른 암반터널에서 해석을 수행하여 보정계수의 차이를 파악할 필요가 있다.

참고문헌

1. 박연준, Dawsao E.M., 1997 터널과 지하공간 7.3, 202-207.
2. 박연준, 유광호, 1998, 터널과지하공간, 8, 4, 287-295.
3. 유광호, 박연준, 매규진, 2000, 대한터널협회 논문집, 2, 3, 47-57.
4. Bishop A. W, 1955 The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slope, Geotechnique, Vol.5, 7-17.
5. Duncan J. M., 1996 State of the Art Limit Equilibrium and Finite-element Analysis of Slopes, J.Geotech. Engng. Div Am. Soc. Civ. Engrs. 122, 3, 577-596.
6. Barton, N. And Choubey, V. (1977) " The shear Strength of rock joints in theory and practice." Rock Mechanics, vol.10 1-54.