터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 10, 2000, pp. 403~409

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 10, 2000, pp. 403-409
J. of Korean Society for Rock Mech.

암반조건에 따른 암반-지보 반응거동의 수치해석적 연구

전양수[1] · 한공창[2] · 신중호[3]

Rock-support Interaction behavior for Ground Condition based on Numerical Modelling

Yang-Soo Jeon, Kong-Chang Han and Joong-Ho Synn

ABSTRACT It is very important to control the final load that acts on a support system, in tunnel engineering. A reliable analysis is needed to carry out technically reasonable design and safe construction. Also, a series of procedures of construction and the rock-support interaction behavior must be considered. Most existing studies have been performed as the limited analysis based on the simplified assumption. In this study, through the analysis of a circular tunnel using a 2-D finite differential code, the rock-support interaction behaviors in the variation of rock and stress conditions are analyzed and compared with the results from the closed form solutions. Consequently, more realistic rock-support interaction curves are obtained by including the effects of initial stresses and rock condition. These curves are very useful to predict the required support pressure in the initial design stage.

Key words : Rock-support interaction, Tunnel, Support, Initial stress, Numerical modelling

초 록 : 터널공학에 있어서 지보시스템에 가해지는 최종 하중을 제어하기 위한 지보의 거동에 관한 많은 연구가 실시되었다. 기술적으로 타당한 설계와 안전율이 확보된 경제적인 시공을 위해서는 해석의 신뢰성이 확보되어야 한다. 또한 굴착과 보강의 일련의 시공과정에 대한 역학적인 이해가 필요하며 암반-지보 반응거동에 대한 규명이 이루어져야 한다. 암반과 지보의 거동에 관한 대부분의 연구는 단순화한 가정에 의한 이론적 해석이 주를 이루고 있다. 또한 터널 주위의 암반 조건에 따른 명확한 기준이 없어 터널 설계시 어려움이 많다. 본 연구에서는 유한차분해석 프로그램인 FLAC을 이용하여 암반조건에 따른 해석을 실시하여 암반-지보 반응곡선을 구하였다. 실제 시공과 유사한 조건을 부여하기 위해 암반등급과 측압계수를 달리하여 해석을 실시하였다. 그 결과 암반조건에 다른 암반-지보 반응곡선의 nomogram을 도출하였으며, 이는 설계 초기에 지보압 및 터널의 허용변위에 대한 효율적인 예측을 실시하는데 있어 유용할 것이다.

핵심어 : 암반지보 반응곡선, 터널, 지보, 초기응력, 수치모델링

1. 서 론

지하 암반에 터널이 굴착되면 현장응력의 재분포에 의해 터널주위의 암반에는 변형이 발생하며, 이러한 변형에 대한 터널의 안정성을 유지하기 위해서는 효과적인 지보재가 설치되어야한다.[1] 터널주위의 암반의 응력-변형 특성은 암반자체의 물성이나 현장응력 조건은 물론 지보재의 강성도와 타설시기에 의존하며,[4,5,8] 이러한 암반에서의 체계적인 응력완화를 위해서는 암반-지보의 상호거동을 이해해야한다.[3,6]

암반-지보 반응곡선을 결정하기 위해서는 여러 가지 인자가 필요하며 단순한 정수압상태의 원형터널의 경우에도 지보재 선택에 대한 명확한 기준을 제시하기가 어렵다.[2] 따라서 효율적인 지보설계 및 터널변위의 예측을 위해서는 현장응력의 상태나 암반의 강도특성 등에 따른 암반-지보 거동특성에 관한 연구가 필요하다.

최근의 일련의 연구에서는 지보재의 물성과 타설시기에 관한 연구,[1,2] 복합지보체계의 시간의존적 비선형성 연구,[10] 암반등급에 따른 거동특성 연구[3] 등이 이루어졌

1) 정회원, 한국자원연구소 연구원
2) 정회원, 한국자원연구소 책임연구원
3) 정회원, 한국자원연구소 선임연구원
접수일 : 2000년 8월 1일
심사 완료일 : 2000년 8월 19일

다. 이러한 연구들에서는 이론적 해석의 가정을 극복하기 위한 많은 시도를 하였으나 모두 정수압 조건하에서 실시되어 보다 복잡한 현장응력조건에서의 적용에는 무리가 있다.

본 논문에서는 현장응력이 다른 다양한 지반조건에서의 암반의 거동특성을 규명하기 위해서 Hoek-Brown 경험적 파괴기준을 이용하여[7] 이론해를 구하였으며, 이를 FLAC 프로그램의 반복해석을 통해 도출된 결과와 비교하였다.

2. 암반-지보 거동 특성

Hoek와 Brown(1980)은 암반-지보 반응거동을 규명하기 위해서 수평 및 수직응력의 크기가 동일한 원형터널에서의 변위를 산정할 수 있는 이론식을 제시하였다.[7] 암반은 완전탄성체로 가정하였으며, 일차파괴 후 암반은 완전소성거동을 보인다고 가정하였다. 파괴기준은 다음의 관계식을 이용하였다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

여기서 σ_1은 최대주응력, σ_3는 최소주응력, σ_c는 신선암의 단축압축강도이며, m과 s는 암반의 파괴특성계수이다. 전반적인 수식의 전개는 원문에 상세히 기재되어 있어 본 논문에서는 생략하였다.

암반과 지보재 사이의 상호 거동은 Fig. 1의 암반-지보 상호거동곡선에 의해 정성적으로 설명할 수 있다[8].

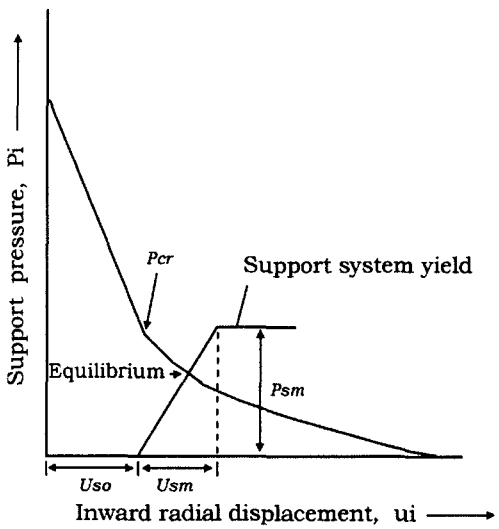

Fig. 1. Rock-support interaction curve.

위의 그림에서 p_{cr}은 암반의 소성파괴의 개시점인 임계지보압을 의미하며, u_{so}는 지보재 설치이전의 암반의 초기변형량, u_{sm}은 지보재의 탄성변위 그리고 p_{sm}은 지보재의 항복으로 정의되는 최대지보압이다. 그림에서 볼 수 있듯이 지보재의 설치시기가 늦거나 저항 능력이 부족하면, 암반-지보계는 평형상태에 도달할 수 없게 된다.

3. 해석 Model

해석조건으로는 균질한 암반내에 직경이 10 m인 터널이 심도 400 m에 굴착된 상태로 설정하였으며, 이때 수직응력은 10 MPa이 작용하는 것으로 가정하였다. 또한 암반의 밀도(ρ)는 0.0245 MN/m^{3}로 포아송비(ν)는 0.25로 설정하였다.

3.1 입력물성의 결정

암반등급별 거동특성을 고찰하기 위해서 RMR등급을 이용하였으며, 20에서 100까지 10씩 증가하는 총 9개의 암반그룹으로 세분하였다. 각 암반그룹별 물성은 Table 1과 같다.

해석에 사용될 입력물성의 결정과정은 다음과 같다.

암반의 단축압축강도(σ_{rm})는 RMR과의 관계식으로 표현되는 다음의 Trueman(1988)[9]의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_{rm}[\mathrm{MPa}] = 0.5\exp(0.06\mathrm{RMR}) \quad (2)$$

신선암의 단축압축강도(σ_c)는 위에서 구한 암반의 단축압축강도와 Hoek-Brown의 파괴기준식을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{rm} = \sigma_c\sqrt{s} \quad (3)$$

표에서 나타난바와 같이 RMR점수 40이하의 경우에도 상당히 높은 압축강도 값을 보이고 있으나 신선암의 압축강도는 불연속성이 없는 intact한 경우에서 얻어진 값이므로 타당할 것으로 본다.

암반분류값으로부터 암반의 변형계수(E_{rm})를 구하는 여러 경험식이 있으나, 본 논문에서는 RMR = 80이하는 Serafim and Pereira(1983)의 식을 그 이상에서는 Bieniawski(1978)의 식을 이용하여 다음과 같이 결정하였다.

Table 1. Input data of each rock masses.

RMR	σ_{rm} (MPa)	m_i	Disturbed		Un-Disturbed		σ_c (MPa)	E_{rm} (GPa)	K* (GPa)	G* (GPa)
			m_r	s_r	m	s				
20	1.66	7	2.31E-02	1.62E-06	4.02E-01	1.38E-04	141	1.78	1.19	0.71
30	3.02	10	6.74E-02	8.57E-06	8.21E-01	4.19E-04	148	3.16	2.11	1.26
40	5.51	13	1.79E-01	4.54E-05	1.53E+00	1.27E-03	154	5.62	3.75	2.25
50	10.04	16	4.50E-01	2.40E-04	2.68E+00	3.87E-03	162	10.00	6.67	4.00
60	18.30	19	1.09E+00	1.27E-03	4.55E+00	1.17E-02	169	17.78	11.86	7.11
70	33.34	23	2.70E+00	6.74E-03	7.88E+00	3.57E-02	177	31.62	21.08	12.65
80	60.76	27	6.47E+00	3.57E-02	1.32E+01	1.08E-01	185	56.23	37.49	22.49
90	110.70	30	1.47E+01	1.89E-01	2.10E+01	3.29E-01	193	80.00	53.33	32.00
100	201.71	33	3.30E+01	1.00E+00	3.30E+01	1.00E+00	202	100.00	66.67	40.00

* K: bulk modulus, G: shear modulus

RMR ≤ 80 일 때,

$$E_{rm}[GPa] = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (4)$$

RMR 〉 80 일 때,

$$E_{rm}[GPa] = 2RMR - 100 \quad (5)$$

Hoek-Brown의 파괴특성계수들은 아래의 식들로부터 결정할 수 있다. 신선암(s = 1)의 특성계수값인 m_i는 Hoek, Kaiser and Bawden(1995)[8]으로부터 암반등급별로 다른 값을 주관적으로 결정하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

교란된 암반

$$m_r = m_i \exp\left(\frac{RMR-100}{14}\right) \quad (6)$$

$$s_r = \exp\left(\frac{RMR-100}{6}\right) \quad (7)$$

불교란암반

$$m = m_i \exp\left(\frac{RMR-100}{28}\right) \quad (8)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR-100}{9}\right) \quad (9)$$

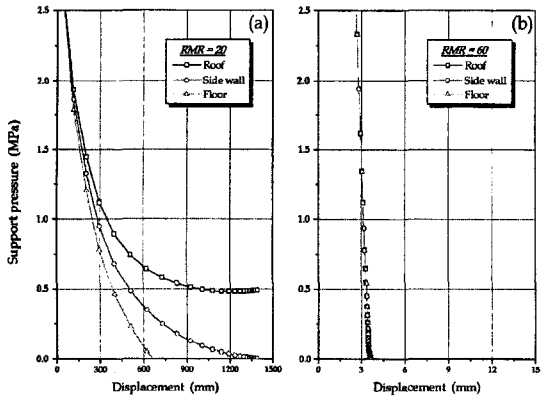

Fig. 2. Load-deformation characteristic curve from closed form solution. (a) RMR = 20, (b) RMR = 60

4. 이론적 암반거동특성

앞장에서 언급한바와 같이 총 9개의 암반그룹별로 지보압을 초기응력값인 10 MPa에서 순차적으로 감소시켜가며 이론해를 구하였다. 암반의 밀도(ρ)는 0.0245[MN/m^3]이고 포아송비(ν)는 0.25인 직경 10 m의 터널에 초기지압 10 MPa이 작용하는 것으로 설정하였다. 입력물성은 Table 1에 제시된 바와 같다.

Fig. 2는 이론해의 결과를 나타낸 그림이다.

Fig. 2는 지보압(support pressure)의 변화에 따른 터널의 천반부(roof), 측벽부(side wall), 바닥부(floor)의 반경방향변위(radial displacement)를 나타낸 것이다. RMR등급 very poor인 20의 경우, 천반부에서 파쇄암반

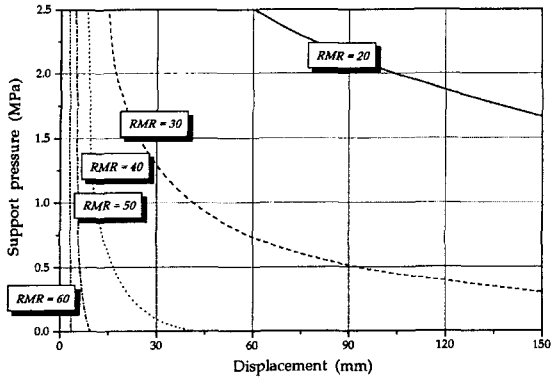

Fig. 3. Load-deformation characteristic curve nomogram. (closed form solution)

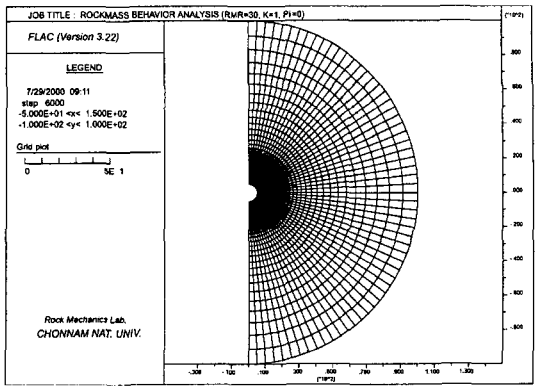

Fig. 4. Finite different mesh for analysis.

의 사하중의 작용으로 인하여 지보압의 증가경향을 보여주고 있으며, RMR등급 good인 60의 경우 거의 탄성거동을 보인다. 또한, RMR등급 good ~ very good에 해당하는 70, 80, 90, 100의 해석에서도 암반은 거의 완전 탄성거동을 보였다.

Fig. 3은 암반등급별 지보압에 따른 터널의 측벽부(side wall)의 변위를 나타낸 그림이다.

전술한 바와 같이 RMR등급 good이상인 70이상에서는 거의 탄성거동을 보였으며, 본 그림에서는 70이상의 경우는 생략하였다. 이는 RMR = 70이상일 경우 자립시간이 약 10^4 시간 이상인 결과와도 부합된다고 할 수 있다.

5. 전산해석

전술한 바와 같이 해석 모델은 직경 10 m의 터널이 균질한 암반에 굴착되는 것으로 가정하였으며, 모델의 외부경계는 터널 직경의 10배로 설정하였다. 총 요소수는 2400개의 radial mesh로 터널 경계에서 외부로 갈수록 요소의 크기는 증가시켰다. 해석모델은 Fig. 4와 같다.

해석에 사용된 물성은 Table 1과 같으며, Hoek-Brown 파괴기준을 만족시키기 위해서 Itasca사에서 제공한 HOEK.FIS를 이용하였다. 이는 실제 모델이 Mohr-coulomb 모델로 구성되지만, 일정 해석단계마다 각 zone의 점착력과 내부마찰각 등이 재계산되도록 구성되어있다.

RMR = 20에서 100까지 총 9개의 암반그룹에서 지보압을 변화시키면서 해석을 실시하였으며, 각 지보압별로 새로운 file의 모델 해석을 실시하였다. 따라서 지보압의 변화로 인한 해석결과의 영향은 제거된다.

지보압은 터널면에 등분포하게 작용하는 것으로 가정하였으며, 적용된 값은10, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, 0.005, 0.0025, 0과 같이 변화시켰다. 이론해의 가정과 일치시키기 위해 굴착과 동시에 지보압이 작용하며 지보가 설치되기 이전의 모델의 변형은 없

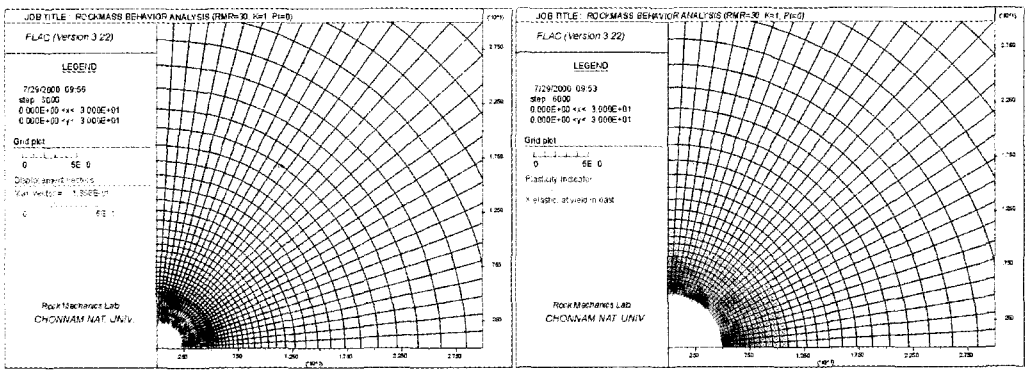

Fig. 5. Displacement vectors and the plastic zone for RMR = 30, K = 1, Pi = 0.

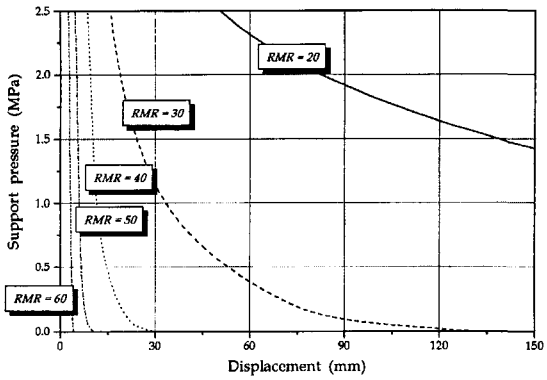

Fig. 6. Load-deformation characteristic curve nomogram. (K=1, FLAC)

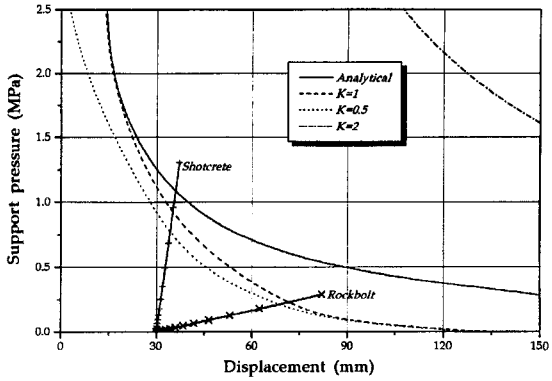

Fig. 7. Rock-support reaction curve for RMR=30

는 것으로 간주하였다.

또한 현장응력조건에 따른 암반의 거동특성을 파악하기 위하여 초기응력비(K)를 1, 0.5 그리고 2의 세 가지의 경우로 세분하여 해석을 실시하였다.

Fig. 4는 RMR = 30의 경우의 변위벡터와 소성영역의 범위를 나타내고 있다.

모든 해석단계에서 모델의 불평형력과 터널의 변위의 수렴여부를 조사하였으며, 완전 수렴이 이루어질 때까지 해석을 실시하였다.

소성이론에 의하면, 암반내에 터널이 굴착되면 암반에 가해진 응력으로 인해 터널의 반경은 r_i로 줄어들게 되며, 터널주위로 r_e의 소성파괴대가 발생한다. 이러한 터널주위의 소성파괴영역의 암반은 결과적으로 천반부(roof)의 사하중으로 작용하여 부가적인 $\gamma_r \times (r_e - r_i)$ 만큼의 지보압의 증가를 필요로 한다[7]. 이때 γ_r은 파괴암반의 단위중량이다. 본 논문에서는 각 해석 결과로부터 터널의 변위와 소성영역의 영역을 기록하였으며, 이로부터 천반부(roof)와 바닥부(floor)의 지보압을 산정하였다.

이론해의 조건과 동일한 초기응력비(K)가 1인 경우의 해석결과를 Fig. 6에 제시하였다. 이론해의 경우와 마찬가지로 RMR = 70이상인 경우에는 거의 완전탄성거동을 보였으며, RMR = 20의 경우 1 m 이상의 터널 변위가 발생되거나 과도한 지보압을 필요로 함을 나타내고 있다.

RMR = 20이고 K = 2의 일부의 경우 (P_i가 2 MPa 미만)와 K = 0.5의 일부의 경우(P_i가 0.5 MPa 미만)에서는 터널의 변위가 터널의 직경에 달하는 등 K = 1에 비해 훨씬 복잡한 파괴형태를 보였다. 이는 과도응력으로 인한 지보재의 파괴를 의미하며, 지반의 보강을 통한 터널의 안정화가 필요함을 의미한다. 이러한 결과는 정수압상태의 이론해를 통해서는 알 수가 없으며, 초기응력상태를 고려한 해석을 통한 암반의 거동특성을 파악해야함을 의미한다.

Table 2. Input data for the support design

rockbolt	elastic modulus (E_b)	207 GPa
	load-deformation constant for anchor (Q)	0.143 m/MN
	ultimate failure load	0.285 MN
shotcrete	elastic modulus (E_c)	20.7 GPa
	poisson's ratio (υ_c)	0.25
	uniaxial compressive strength	34.5 MPa

Fig. 7은 RMR = 30인 경우에 이론해와 다양한 초기응력조건에 따른 암반의 암반-지보 반응특성을 나타낸 것이다.

지보재는 shotcrete나 rockbolt의 단독지보가 설치되는 경우이며, 각각의 물성은 Table 2와 같다. shotcrete는 200 mm두께로, rockbolt의 길이는 4 m, 간격은 1 m, 직경은 25 mm로 설정하였다. 그림에서 보는바와 같이 K = 2인 경우 지보재의 용량을 훨씬 초과하여 터널의 과도한 변형이 발생하고 있으며, 전술한 바와 같이 이러한 결과는 정수압상태의 이론해를 통해서는 알 수가 없으며, 초기응력상태를 고려한 해석을 통한 암반의 거동특성을 파악해야함을 의미한다. 이러한 접근법은 전산해석 결과와 이론적 지보선과의 조합을 통해 설계초기의 지보설계에 도움이 될 것으로 본다.

이론해와 K = 1인 경우의 FLAC해석 결과를 보면, 이론해에서 계산된 임계지보압(P_{cr})인 약 2 MPa 까지는 거의 동일한 거동을 보이다가 그 이하-즉 소성파괴영역 발생점이하-에서는 이론해의 경우가 더 많은 변위를 나타내

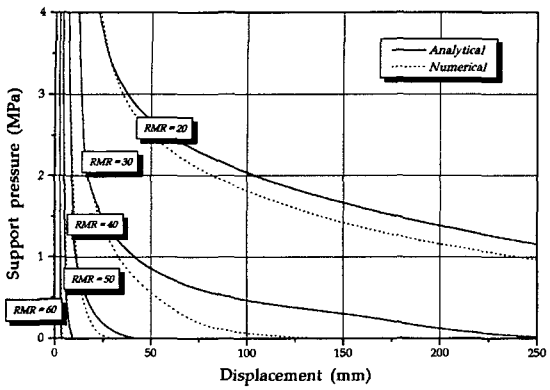

Fig. 8. Load-deformation characteristic curve nomogram.

지만, 그 경향성은 동일하다. 이러한 결과는 소성유동법칙(plastic flow rule)의 표현에 있어서 이론해는 연상유동법칙(associate flow rule)을 따르지만, FLAC의 경우 비연상유동법칙(non-associate flow rule)을 따르는 문제에 기인한 것으로 본다.

6. 해석결과의 검토 및 결론

본 논문에서는 다양한 지반 및 초기응력조건 하에서의 FLAC해석을 실시하였으며, 이를 이론해의 결과와 비교하였다. Fig. 8은 이론해와 FLAC해석의 경우의 필요지보압과 터널측벽부(side wall)의 변위의 관계를 나타낸 그림이다.

이론해와 동일한 조건인 초기응력비가 1인 경우 그 결과 및 경향성은 비슷하게 나타나고 있으나, 모든 암반그룹에 있어서 소성영역발생 후에는 두 결과의 차이가 발생한다. 전술한 바와 같이 이러한 결과는 소성상태의 표현의 차이에서 기인하며 FLAC해석의 경우 보다 현실적인 거동 특성을 나타낸다고 할 수 있다.

따라서 지반과 초기응력상태에 따라 설계초기에 이와 같은 해석을 통해 개략적인 지보압과 변위를 예측할 수 있을 것으로 본다. 또한이론해를 통한 접근이 불가능한 정수압상태가 아닌 경우에도 FLAC해석을 통해 암반의 필요지보압 및 변위를 계산할 수 있었다. 이러한 결과는 Fig. 7과 같이 지보재의 특성곡선과 조합하여 암반-지보 반응 특성을 파악할 수 있을 것이다.

본 논문의 해석은 원형터널의 경우에만 국한되어 해석을 실시하였으므로 실제 문제에 완벽하게 적용되기에는 다소 무리가 있으나 설계초기에 암반거동특성 파악에 도움이 될 것으로 본다. 향후 터널의 형상에 따른 암반-지보반응 및 지보재의 시간의존성 거동에 관한 추가적인 연구가 이루어진다면, 보다 현실적인 지보 설계에 응용될 수 있을 것으로 본다.

이러한 해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 다양한 지반조건 및 초기응력조건에서의 해석을 통해 암반-지보 반응곡선을 유도할 수 있는 방법을 제시하였다.

(2) 전산해석 결과와 이론적 지보특성곡선과의 조합을 통해 설계초기의 지보설계 지침을 제시할 수 있는 방법을 제안하였다.

참 고 문 헌

1. 김혁진, 조태진, 김남연, 1997, 암반-지보 거동분석에 의거한 지하굴착 지보설계에 관한 연구, 한국암반공학회지, 7.1, 1-12
2. 백승한, 문현구, 1998, 터널링에 의한 암반-지보 반응거동에 관한 연구, 한국암반공학회지, 8.4, 321-331
3. Asef, M.R., D.J. Reddish and P.W. Lloyd, 2000, Rock-support interaction analysis based on numerical modelling, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 18, 23-37
4. Brady, B.H.G and E.T. Brown, 1985, Rock Mechanics for Underground Mining, Allen and Unwin, London, 527p.
5. Brown, E.T., J.W. Bray, B. Ladanyi and E. Hoek, 1983, Ground response curves for rock tunnels, Journal of Geotechinical Engineering, ASCE, 109.1, 15-39
6. Daemen, J.J.K., 1977, Problems in tunnelling support mechanics, Underground Space, 1.3, 163-172
7. Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, Underground Excavations in Rock, IMM, London, 527p.
8. Hoek, E., P.K. Kaiser and W.F. Bawden, 1995, Support of Underground Excavations in Hard Rock, A.A. Balkema, Rotterdam, 215p.
9. Trueman, R., 1988, An Evaluation of Strata Support Techniques in Dual Life Gateroads, PhD Thesis, University of Wales, Cardiff
10. Verman, M., B. Singh, J.L. Jethwa and M.N. Viladkar, 1995, Determination of support reaction curve for steel-supported tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 10, 217-224

전 양 수

1996년 전남대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1998년 전남대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과 박사과정수료

Tel : 042-868-3243
E-mail : ysjeon@kis.kigam.re.kr
현재 한국자원연구소 인턴연구원

한 공 창

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1989년 Ecole des Mines de Paris, 지질공학과, 공학석사
1993년 Ecole des Mines de Paris, 지질공학과, 공학박사

Tel : 042-868-3241
E-mail : hankc@kigam.re.kr
현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원

신 중 호

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 042-868-3242
E-mail : jhsynn@kigam.re.kr
현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원