

## 록볼트의 2차원 수치해석에 대한 타당성 검토

정현석<sup>1)</sup>, 양형식<sup>2)\*</sup>, 김보현<sup>3)</sup>

### A Study on the Validity of 2-Dimensional Analysis of Rock Bolt

Jeong Hyeon Seok, Yang Hyung Sik and Kim Bo Hyun

**Abstract** The stability of tunnels is usually analyzed as plain strain condition and rock bolts are assumed as 2 dimensional equivalent continuum structures. In this study, 2 and 3 dimensional numerical analyses were conducted to verify the validity of 2 dimensional analysis of rock bolts. Since the results of 2 dimensional analysis showed more than 10% differences in poor rocks, it seems that 3 dimensional analysis is required in poor rocks.

**KeyWords** Rock Bolt, 2 Dimensional Analysis, Numerical Analysis

**초 록** 편의상 터널을 평면변형률조건으로 해석하는 경우가 많은데 이때 록볼트는 등가의 연속체로 가정하여 해석한다. 본 연구에서는 3차원해석과 2차원 해석을 비교하여 현행의 2차원 해석이 타당한지를 평가하였다. 해석 결과 불량한 지반에 대한 2차원 해석에서는 10% 이상의 변형 오차가 발생하여 3차원적 고려가 필요한 것으로 판단되었다.

**핵심어** 록볼트, 2차원 해석, 수치해석

## 1. 서 론

지하 암반에 터널이 굴착되면 현지응력의 재분포에 의해 터널주위의 암반에는 변형이 발생하게 된다. 이러한 변형에 대해 안정성을 유지하기 위해서는 기술적으로 타당한 설계와 안전율이 필요한데 무엇보다 해석의 신뢰성이 확보되어야 한다.

이러한 수치해석을 시행하는데 있어서 3차원 해석이 실제와 유사한 거동을 보임에도 불구하고 모델의 구성이 복잡하고 해의 수렴에 걸리는 시간이 길다는 이유 등으로 2차원 해석이 많이 이용되고 있는 실정이다.

그러나 2차원 해석에서 록볼트 물성값 입력시 3차원적인 모델링이 불가능하므로 록볼트의 설치간격을 고려하기 위해서는 록볼트 물성값을 설치간격으로 나누어 등가치로 입력하게 된다. 이러한 이유로 2차원 해석결과를 지보재의 설치 형태나 간격에 관계없이 굴착

방향으로 변위나 응력 등이 일정하게 일어나는 것으로 해석이 되므로 실제와는 많은 차이가 생길 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2차원과 3차원 해석에서의 록볼트 지보효과와의 차이를 변위의 차이로 규명함으로써 2차원 해석에서 등가 연속체 가정의 타당성을 검토하였다.

## 2. 입력물성치 선정

본 연구에서는 암반등급별 거동특성을 고찰하기 위해, RMR점수 10에서 80까지 10씩 증가하는 5등급부터 2등급까지의 8개의 암반그룹으로 세분화하였고, 해석에서 사용된 각 암반그룹별 입력물성은 Table 1과 같다. 암반의 단위중량은  $24.5 \text{ kN/m}^3$ , 포아송 비( $\nu$ )는 0.25로 하였다.

해석에 사용될 입력물성의 결정과정은 다음과 같다.

암반의 단축압축강도( $\sigma_m$ )는 RMR과의 관계식으로 표현되는 다음의 Trueman(1988)의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_m = 0.5 \exp(0.06 \text{ RMR}) \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

무결암의 단축압축강도( $\sigma_c$ )는 위에서 구한 암반의 단

<sup>1)</sup> 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사과정

<sup>2)</sup> 정회원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

<sup>3)</sup> 정회원, 대한광업진흥공사

\*교신저자(Corresponding Author): hsyang@jnu.ac.kr

접수일: 2004년 12월 14일

심사 완료일: 2004년 12월 23일

축압축강도와 Hoek - Brown의 파괴기준식을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{rm} = \sigma_c \sqrt{s} \quad (2)$$

Table 1에서 나타난 바와 같이 RMR 점수 40이하의 경우에도 상당히 높은 압축강도 값을 보이고 있으나 무결암의 압축강도는 불연속성이 없는 intact한 경우에서 얻어진 값이므로 타당할 것으로 본다.

암반분류값으로부터 암반의 변형계수 ( $E_m$ )를 구하는 여러 경험식이 있으나, 본 논문에서는 RMR 50이하는 Serafim 과 Pereira(1983)의 식을, 그 이상에서는 Bieniawski (1978)의 식을 이용하여 다음과 같이 결정하였다.

RMR < 50 일 때,

$$E_{rm} = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (\text{GPa}) \quad (3)$$

RMR > 50 일 때,

$$E_{rm} = 2RMR - 100 \quad (\text{GPa}) \quad (4)$$

Hoek - Brown의 파괴특성계수들은 아래의 식들로부터 결정할 수 있다. 무결암( $s=1$ )의 특성계수값인  $m_i$ 는 Hoek 등(1995)으로부터 암반등급별로 다른 값을 주관적으로 결정하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타난 바와 같다.

교란된 암반

$$m_r = m_i \exp\left(\frac{RMR-100}{14}\right) \quad (5)$$

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

불교란 암반

$$m_r = m_i \exp\left(\frac{RMR-100}{28}\right) \quad (7)$$

$$s_r = \exp\left(\frac{RMR-100}{9}\right) \quad (8)$$

Hoek(1990)는 그들의 파괴조건계수로부터 Mohr - Coulomb의 파괴조건계수를 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. Hoek - Brown 파괴조건계수 ( $m, s$ )는 RMR에 따라 현지 암반 값으로 변환이 가능하기 때문에 이들을 이용한 암반의 Mohr - Coulomb 파괴조건계수  $c_m$ 과  $\phi_m$ 은 다음 식을 이용해서 산정할 수 있다.

$$\phi_m = 2 \tan^{-1} \sqrt{k(\sigma_3)} - 90^\circ \quad (9)$$

$$c_m = \frac{\sigma_{cm}}{2\sqrt{k(\sigma_3)}} \quad (10)$$

본 연구에서도 이러한 과정을 거쳐서 Mohr-Coulomb 파괴조건계수를 구하였고 해석에서도 이 기준을 적용하였다.

Table 1. Input data for each rock masses

RMR	$\sigma_{rm}$ (MPa)	$m_i$	$m$	$s$	$\sigma_c$ (MPa)	$E_{rm}$ (GPa)	$K$ (GPa)	$G$ (GPa)	$c_m$ (MPa)	$\phi_m$ (°)
10	0.90	4	0.16	4.50E-05	136	1	0.67	0.4	0.24	17.35
20	1.66	7	0.40	1.38E-04	141	1.78	1.19	0.71	0.34	23.99
30	3.02	10	0.82	4.19E-04	148	3.16	2.11	1.26	0.44	30.00
40	5.51	13	1.52	1.27E-03	154	5.62	3.75	2.25	0.55	35.56
50	13.55	16	3.21	6.73E-03	165	10	6.67	4	0.74	42.27
60	18.30	19	4.55	1.17E-02	168	20	13.30	8	0.85	45.31
70	33.34	23	7.88	3.56E-02	176	40	26.70	16	1.08	49.81
80	60.75	27	13.22	1.08E-01	184	60	40.00	24	1.43	53.56

K : bulk modulus, G : shear modulus

Table 2. Input data for support design

Support Type	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Unit weight ( kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (MPa)	Tensile strength (MPa)
Soft Shotcrete	5	0.20	24.5	2	0.98
Hard Shotcrete	15	0.20	24.5	5	0.98
Rock Bolt	206.01	0.0005	—	10	343.35

### 3. 하중분담율

하중분담율은 터널굴착에 따른 주변지반의 3차원적 거동을 2차원 수치해석으로 표현하기 위해서 도입된 개념으로 터널굴진에 의하여 터널 주변 지반에는 횡방향 아치와 막장부의 종방향 아치 효과가 발생하기 때문에 엄밀하게는 터널해석에 2차원 평면변형을 조건이 적용될 수 없다. 원칙적으로 터널안정성 평가시 수행하는 3차원 해석은 2차원 해석에 비하여 상당한 경비와 노력이 소요되는 문제가 있다. 따라서 평면변형을 조건에서 종방향 아치효과와 슛크리트 경화시간을 고려하기 위하여 굴착에 의하여 발생하는 총 하중을 굴착, 연성슛크리트(soft shotcrete), 경성 슛크리트(hard shotcrete)의 3단계로 분배하는 방법이 사용되고 있으며 이를 하중분담율이라 한다.

하중분담율을 수치해석에 적용하는 방법에는 강성변화모델, 하중분담모델, 내부압력조절법 등이 있다. 강성변화모델은 굴착단면 내부의 강성을 변화시키는 방법이고, 하중분담모델은 굴착상당력에 하중계수를 곱하여 적용하는 방법으로 전역강성 행렬  $[k]$ , 절점변위벡터  $\{u\}$ , 절점하중벡터  $\{f\}$ 에 대하여  $[K]\{u\}=\{f\}$ 의 식으로 표현되는 유한요소법을 예로 들 수 있으며  $\{f\}$ 에 하중계수를 곱하여 하중분담율을 조정한다. 내부압력조절법은 굴착에 의하여 굴착면에 발생한 불평형력의 반대방향 하중을 굴착면에 작용시키는 방법으로 FLAC과 같은 explicit scheme의 유한차분법에서 적용되고 있다. 이 중 강성변화모델은 터널변위 발생 양상이 실제 계측 결과 및 3차원 해석결과와 큰 차이가 있으므로 현재는 후자의 두 방법이 적용되고 있다(최항석, 1994).

하중분담율에 미치는 영향요소로는 터널의 크기, 토 피고, 단면형상, 굴진장, 지보량 등의 설계 조건과 지반의 변형 및 강도특성 등의 지질조건을 들 수 있으나 3차원 해석을 통한 연구결과에 의하면, 터널의 크기(D), 일일 굴진장(L), 슛크리트 두께(T) 및 지반의 탄성계수(E)가 주요 영향요소임이 밝혀졌다. 특히, 이 4개의 주요 영향인자의 조합에 대한 72경우의 3차원 수치해석을 통하여 각 경우에 대한 굴착( $\alpha$ ) - 연성슛크리트( $\beta$ ) - 경성슛크리트 - ( $\gamma$ )단계에 대한 하중분담율을 정리한 바 있다(정대열, 1993). 그리고 이러한 연구를 토대로 민감도 분석을 실시하여 다음과 같은 하중분담율 추정식을 산정하였다(장석부, 1998).

$$\alpha = 3.340L + 3.778 \ln E \quad (11)$$

$$\gamma = -3.126L + 3.391D \quad (12)$$

Table 3은 하중분담율 추정식을 이용하여 산정된 하

중분담율이다.

### 4. 수치해석

2차원 해석을 이용하여 터널의 안정성을 평가하는 경우 입체적인 모델링이 불가능하므로 지보재의 설치간격을 고려하기 위해서 지보재의 물성을 설치간격으로 나누어 준 등가물성을 사용하게 된다. 이러한 결과는 대표단면에서 변위나 응력 등이 동일하게 해석이 되기 때문에 본 절에서는 3차원 해석을 이용한 실제 지보재와 지보재 사이 영역, 지보재 영역에서 발생하는 변위의 차이를 검토하였다.

Table 3. Load Distribution

RMR	$\alpha$ (%)	$\beta$ (%)	$\gamma$ (%)
10	42	30	28
20	44	28	28
30	45	28	27
40	47	26	27
50	50	25	25
60	53	22	25
70	56	20	24
80	58	18	24

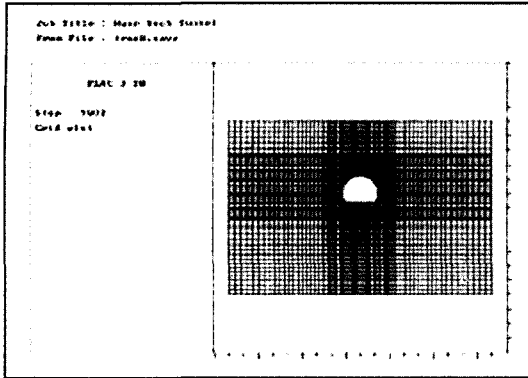
#### 4.1 해석모델의 구성 및 입력조건

본 연구에서는 암반의 거동 양상을 파악하기 위하여 2차원 및 3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC2D와 FLAC3D를 이용하여 변위양상을 분석하였다.

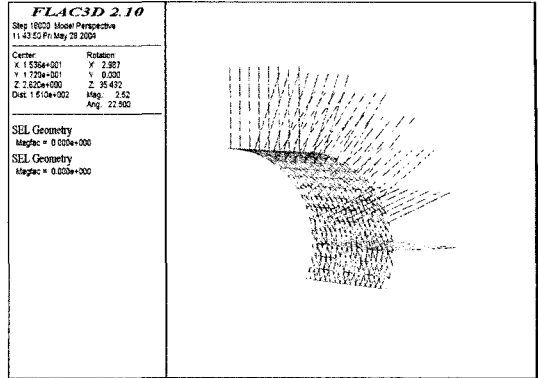
Fig. 1은 해석에 사용된 2차원 및 3차원 모델을 나타낸다. 2차원 해석의 경우 평면변형을 조건에 의한 해석을 수행하였으며, 파괴조건은 Mohr - Coulomb 파괴조건식을 사용하였다. 해석에 사용된 모델의 크기는 가로 150 m, 세로 100 m이고 터널의 단면의 크기는 폭은 12 m, 높이 9 m이다. 지층의 두께는 30 m이며 요소망은 일반적으로 굴착에 따른 응력변화가 크게 발생하는 터널 굴착면 주위에 조밀하게 배치하였다. 경계조건은 상부지표면은 자유경계조건, 측면과 하부는 각각 면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위경계조건을 적용하였다. 그리고 3차원 해석모델의 경우 2차원 해석의 경우와 같은 파괴조건식을 사용하였으며 모델의 크기는 높이가 100 m, 가로 50 m, 길이 30 m이다.

#### 4.2 해석결과

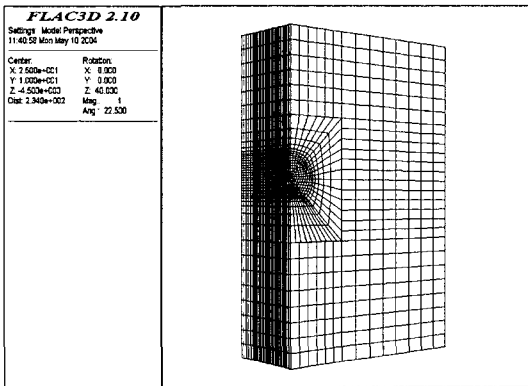
3차원 해석 결과로서 먼저 록볼트가 설치된 지점과 설치되지 않은 지점의 변위차이를 비교 검토해 보았다. Fig. 2는 록볼트와 슛크리트가 설치된 모습으로 굴착



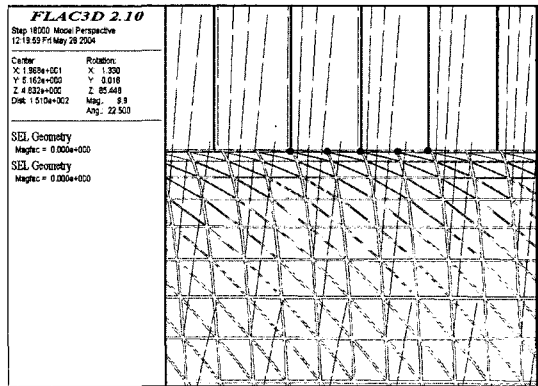
(a) 2D model



(a) rock bolt and shotcrete



(b) 3D model



(b) zoom-in view of the support

Fig 1. Numerical model of a tunnel

Fig 2. 3D model of rock bolts

후 록볼트가 설치된 지점(1, 3, 5)과 록볼트가 설치되지 않은 지점(2, 4)으로 구분하였다.

Fig. 3은 굴착과정에 따른 천정부의 수직변위양상을 정리한 결과이다. 전체적인 변위곡선의 양상은 굴착이 진행함에 따라 변위가 증가하다가 수렴곡선의 형태를 보이고 있다. Fig. 3 (a)의 결과는 RMR등급 10일 때의 결과로 설계시 중요하게 고려되는 수렴 후 변위 결과를 살펴보면 록볼트가 설치된 지점(1, 3, 5)은 2.75 mm, 록볼트가 설치되지 않은 지점(2, 4)은 3.2 mm의 변위가 발생하여 약 16%의 변위차이를 보이고 있다. 또한 RMR 등급이 20인 경우는 각각 1.38 mm, 1.51 mm의 변위가 발생하여 약 9%의 변위차를 보이고 RMR등급이 양호해 질수록 발생하는 변위차가 5%, 4%, 2%로 감소하였다. 이러한 결과는 지반이 양호해질수록 지반자체의 지보능력이 증가해서 록볼트의 지보효과가 감소했기 때문이다.

Fig. 4는 2차원 해석시 수직변위 발생량과 3차원 해석시 변위량을 상호 비교한 결과이다. 2차원 해석결과

와 록볼트가 설치된 지점(1, 3, 5)의 변위 차이는 최대 4%로 2차원 해석 결과가 약간 높게 나타나긴 하지만 거의 일치하는 결과를 보여주고, 록볼트가 설치되지 않은 지점(2, 4)와의 차이는 최대 20%까지 발생하였다.

이와 같은 결과를 종합해 보면 3차원적인 배열을 갖는 록볼트를 2차원 등가구조로 가정하여 해석하는 경우 록볼트가 설치된 지점과 설치되지 않은 지점간에는 최대 16%에 달하는 차이를 보이고 록볼트가 설치되지 않은 지점의 2차원 해석과 3차원 해석치가 최대 20% 차이를 보일 수 있으므로 변위의 정확도가 중요한 경우에는 2차원 등가해석을 적용하는 것에 주의를 기울일 필요가 있을 것으로 생각된다.

특히 RMR등급이 10, 20인 V 등급 암반인 경우에 수렴변위 곡선에서 보여주고 있는 바와 같이 약 10% 이상 변위 차이가 발생하였다. 따라서 이러한 차이를 2차원 해석에서는 고려해주지 못하므로 보다 신뢰성 있는 수치해석 결과를 얻고자 한다면 3차원 해석을 해야 할 것으로 판단되고 나머지 I, II, III 등급의 경우에는

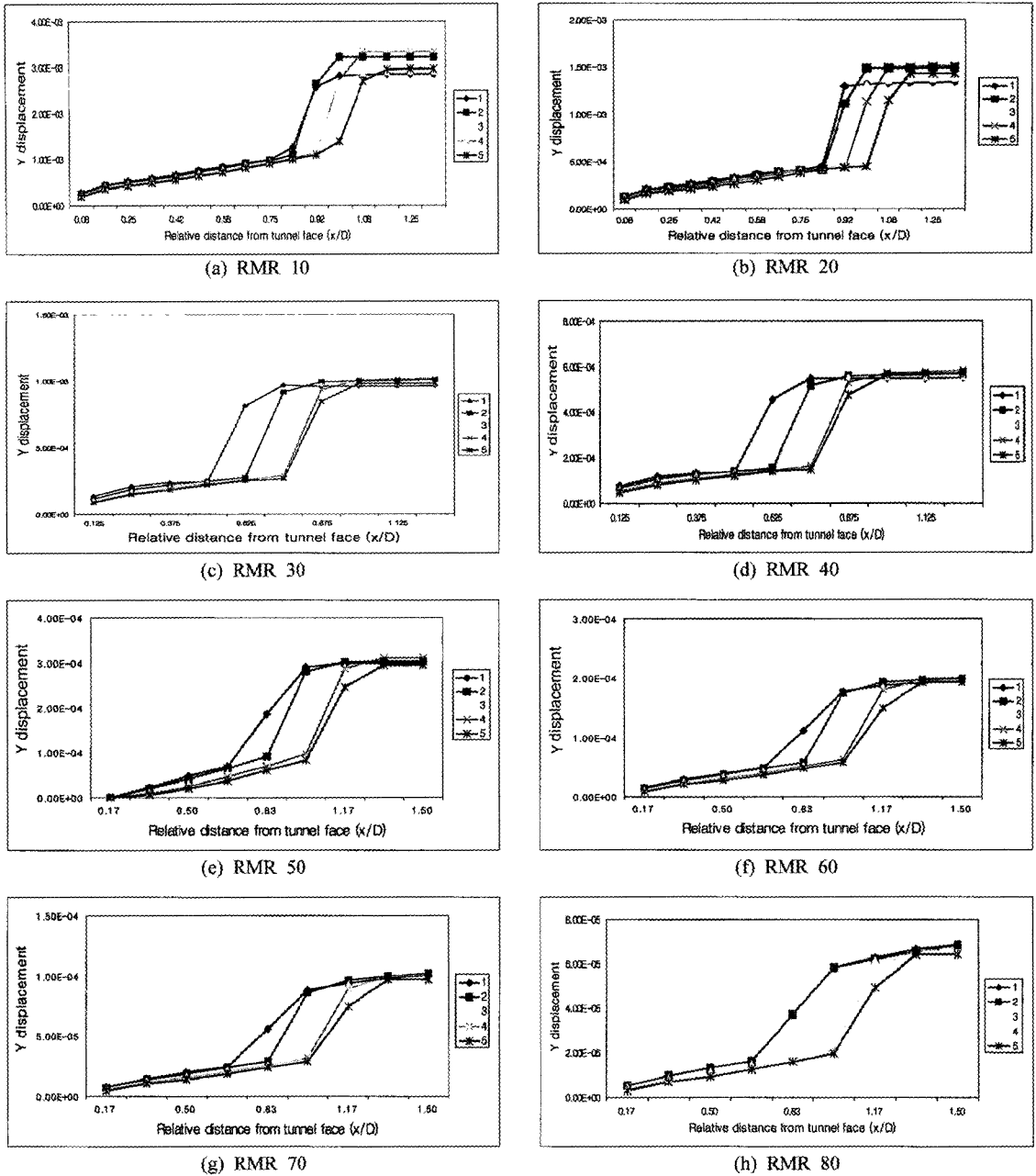


Fig 3. Calculated displacements of tunnel crown during excavation (3D analysis)

변위차가 5% 내이므로 2차원 해석을 수행해도 무방할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 록볼트 지보효과를 이용하여 록볼트가

설치된 지점과 록볼트 사이의 수직변위 차이를 비교 검토함으로써 2차원 해석에 대한 타당성을 검토하였다.

1) 3차원 해석을 수행한 결과 록볼트가 설치된 지점과 설치되지 않은 지점의 변위 차는 최대 16%의 변위의 차이를 보이고 RMR 등급이 양호해 지면서 그 차이가 점차 감소하였다.

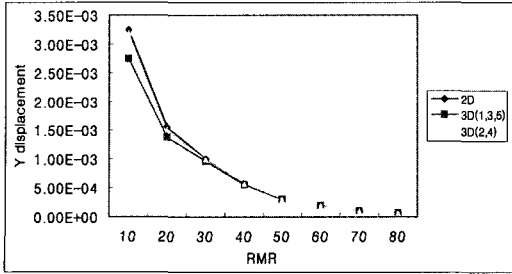


Fig 4. Comparison of displacements derived by 2D and 3D analyses

- 2) 2차원과 3차원 해석에 대한 비교결과는 2차원 해석 결과와 록볼트가 설치된 지점의 변위는 거의 일치하는 결과를 보였지만 록볼트가 설치되지 않은 지점의 차이는 최대 20% 까지 발생하여 변위의 정확도가 중요한 경우, 2차원 등가해석을 재고할 필요가 있을 것으로 생각된다.
- 3) 이상의 결과를 종합해 보면 RMR 등급이 V등급인 경우에 2차원, 3차원 해석 결과가 약 10% 이상 변위의 차이를 나타내므로 보다 신뢰성 있는 수치해석을 수행하기 위해서는 3차원 해석을 해야 할 것으로 판단되며, 나머지 I, II, III등급의 경우에는 변위 차가 적어 2차원으로 해석해도 무방할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 장석부, 문현구, 1988, 터널 설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구, 한국지반공학회지, 14.5, 5-15.
2. 정대열, 1993, 터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 분석 모델의 하중분배율에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교, 51-90.
3. 최항석, 1994, 응력집중을 고려한 터널의 3차원 거동에 관한 연구, 석사학위 논문, 고려대학교, 112p.
4. Bieniawski Z.T., 1978, Determining rock mass deformability : experience from case histories, Int. J. Rock Mech., Min. Sci. 15, 237-247.
5. Serafim J. L. and J. P. Pereira, 1983, Considerations of the geomechanics classification of Beiniawski, Proc. Int. Symp. Eng. Geol. Underground Constr., A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, 33-42.
6. Trueman, R., 1988, An Evaluation of Strata Support Techniques in Dual Life Gateroads, Ph.D. Thesis, University of Wales, Cardiff.
7. Hoek E., 1990, Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values form the Hoek-Brown failure criterion, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27, 227-229.
8. Hoek, E., P.K Kaiser and W.F. Bawden, 1995, Support of Underground Excavation in Hard Rock, A.A. Balkema, Rotterdam, 215p.

정 현 식

2003년 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사



Tel: 062-530-0824  
E-mail: jolaman123@hanmail.net  
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사과정

양 형 식

1979년 서울대학교 자원공학과 학사  
1981년 서울대학교 자원공학과 석사  
1987년 서울대학교 자원공학과 박사



Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr  
현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

김 보 현

1996년 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사  
1998년 전남대학교 대학원 자원공학과 석사  
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 박사



Tel: 062-530-0824  
E-mail: zicman@edunet4u.net  
현재 대한광업진흥공사