

전면접착형 록볼트의 보강효과에 관한 연구

정해성¹⁾ · 문현구²⁾

A Study on the Reinforcement Effects of Fully-Grouted Rock Bolts

Hae-Sung Jung and Hyun-Koo Moon

ABSTRACT The axial stress in rock bolt, the shear stress at the bolt-grout interface and the neutral point are analyzed to understand the mechanical behavior of rock bolt. To analyze the support effects of rock bolt in various geological conditions, numerical analyses are performed with regard to bolt spacing and bolt length in several geological conditions and tunnel sizes. Through the numerical analyses, the distributions of maximum tensile stress and shear stress are determined. And the excavation width of underground opening affects the position of the neutral point. In the circular opening supported by pattern bolting, the increase of confining pressure, the reduction of plastic zone, and that of ground displacement are determined by using the radial stress increase ratio, the plastic zone reduction ratio and the displacement reduction ratio respectively. The results of this study can be applied to a practical tunnel design through understanding of the trends of these support effects.

Key words : rock bolt, shear stress, axial stress, neutral point, radial stress increase ratio, plastic zone reduction ratio, displacement reduction ratio

초 록 본 연구에서는 록볼트의 역학적 거동을 파악하기 위하여 지하공동에 설치된 단일 록볼트에 발생하는 축응력 분포, 록볼트-그라우트 접촉면에서의 전단응력 분포와 중립점의 위치를 분석하였으며, 현장의 다양한 지질조건에 대한 록볼트의 보강효과를 분석하기 위하여 여러가지 지반조건과 터널크기에서 록볼트의 설치간격과 설치길이를 변화시키며 전산해석을 수행하였다. 전산해석 결과, 최대 인장응력 및 전단응력의 분포를 파악할 수 있었으며, 중립점의 위치에 영향을 주는 인자가 공동의 굴착폭임을 알 수 있었다. 또한 패턴볼팅으로 보강된 원형공동에서 록볼트에 의한 암반의 봉압효과는 응력 증가비를 사용하여 분석하였으며, 소성대 감소효과와 지반 변위 감소효과는 각각 소성대 감소비와 변위 감소비를 사용하여 분석하여 록볼트의 보강효과 경향을 파악할 수 있었다. 이러한 보강효과의 경향분석 결과는 실제 터널의 안정적 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : 록볼트, 전단응력, 축응력, 중립점, 응력 증가비, 소성대 감소비, 변위 감소비

1. 서 론

지하공동 굴착시 발생하는 공동주변에서의 불안정한 암반거동을 억제하여 안전한 공동을 시공하는데 필요한 록볼트는 굴착 즉시 시공하여 암반의 이완을 초기에 방지할 수 있다는 장점이 있으나 보강효과에 대한 정량적인 분석에는 어려움이 있다. 록볼트 보강법은 경제적인 뿐만 아니라 공동의 단면을 자유롭게 선택할 수 있다는 장점 때문에 많이 활용되어 왔으며, 최근까지 록볼트 보강법에 대한 많은 연구가 진행되어 왔음에도 불구하고 록볼트에 의한 터널 보강법 설계시 해결되지 않은 많은 문제점들이 남아 있다¹⁾.

또한 록볼트-그라우트-암반 복합체는 록볼트-그라우트와 그라우트-암반의 두가지 접촉면이 존재하며 이에 따라 록볼트 인발시험으로부터 몇가지 다른 파괴양상을 보인다. 첫째 록볼트의 직접적 파괴, 둘째 록볼트-그라우트 접촉면의 파괴로 록볼트만 인발되는 경우, 셋째 그라우트-암반 접촉면의 파괴로 록볼트와 그라우트가 하나로 암반에서 인발되는 경우 그리고 마지막으로 록볼트 주변의 암반이 파괴되어 록볼트-그라우트-암반이 전체로 인발되는 파괴양

1) (주)동명기술공단 구조부

2) 정회원, 한양대학교 공과대학 시스템응용공학부 교수
원고접수일 : 1999년 4월 22일

원고 심사 완료일 : 1999년 7월 21일

상이다. 이중 일반적으로 널리 나타나는 파괴양상은 두번째와 세번째의 록볼트-그라우트와 그라우트-암반 접촉면의 파괴로 이에 대한 집중적 연구가 필요하다²⁾.

국내에서도 전면접착형 록볼트의 지보거동이 김호영과 이희근(1991)에 의해 연구되어진바 있으며³⁾, 일반적으로 록볼트를 모사하는 선형 보요소의 평면변형을 해석에서는 보요소의 기본 가정에 기인한 한계성 때문에 록볼트 지보의 파괴거동 연구에 가장 중요시되는 그라우트-암반 경계면 및 록볼트-그라우트 경계에서의 전단파괴에 대한 정보를 얻기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 이론식과 수치해석을 통하여 록볼트의 보강효과 및 거동에 대해 분석하였으며, 록볼트의 역학적 거동을 파악하기 위하여 지하공동에 설치된 단일 록볼트에 발생하는 축응력(인장) 분포, 록볼트-그라우트 접촉면에서의 전단응력 분포와 중립점의 위치를 측정해석을 통하여 분석하였다. 또한 여러 가지 다른 지반조건과 공동크기에서 록볼트의 설치간격, 설치길이에 따른 보강효과의 특성을 록볼트의 봉압효과, 소성대 감소효과와 공동의 내공변위 감소효과를 중심으로 파악하였다.

2. 문헌연구

터널 및 지하공동 등 지하구조물 건설에 있어서 안정성 향상을 목적으로 널리 사용되고 있는 보강재의 개념을 파악하고 보강재의 일종인 록볼트의 역학적 거동과 보강효과를 고찰함으로써 합리적인 보강설계를 위한 이론적 근거를 제공할 수 있다.

2.1 하중전달 메커니즘

보강재의 거동과 보강효과를 이해하는데 가장 중요한 것은 하중전달 개념으로서 i) 불안정한 암반에서 보강요소로의 하중전달, ii) 불안정한 암반내에 설치된 보강요소에서 안정된 내부 암반에 설치된 보강요소로의 하중전달, iii) 보강요소에 내재된 하중의 안정된 암반으로의 전달의 총 3단계 메커니즘으로 설명할 수 있다.⁴⁾

암반과 보강요소간의 하중전달 메커니즘에 근거하여 록볼트류를 continuous mechanically coupled(CMC), continuous frictionally coupled(CFC), discrete mechanically and frictionally coupled(DMFC)의 세가지 형태로 분류할 수 있다.⁴⁾

CMC 보강재는 보강재 설치공과 보강재 사이의 공간을 그라우트재로 충전함으로써 보강효과를 확보하는 것으로,

그라우트재의 주요 기능은 암반과 보강재간의 하중전달을 위한 연결고리를 제공하는 것이다. CFC 보강재의 거동은 CMC 보강재와 유사하지만 보강재가 암반과 직접적으로 접촉하게 설치된다는 점에서 다르다. 하중전달은 보강재와 설치공간의 마찰에 의해 이루어지고 삽입과정에서 발생하는 반경방향 응력에 의해 구속된다. 이런 보강재는 직경이 작은 보강재가 직경이 큰 설치공에 들어가 확대되거나(Swellex), 직경이 큰 보강재가 직경이 작은 설치공에 들어가 수축되는 것(split set) 중의 하나이다. DMFC 보강재는 보강재의 정착부분을 통하여 역학적 또는 마찰적인 하중전달을 수행하는 보강재로서, 정착부분은 보강재의 전하중을 보장할 수 있을 만큼 충분히 강해야 한다. 이런 보강재에는 wedge bolt, expansion shell bolt 등이 있으며 경암에 적합하다.

2.2 록볼트의 보강효과

현재까지 연구된 결과에 의하면 록볼트의 보강효과는 일반적으로 아치 효과⁵⁾, 봉압 효과⁶⁾, 암반강도 증가효과⁷⁾, 매달기 효과⁸⁾, 마찰 효과⁸⁾ 그리고 칼럼형성 효과⁹⁾ 등으로 알려져 있다. 이런 보강효과는 암반조건, 보강재의 특성, 시공방법 및 시기에 따라 밀접한 관계를 가지고 있다. 실제 지하암반은 수많은 불연속면을 포함하고 있으며, 굴착에 의해 발생하는 응력이 암반의 강도를 초과하지 않으면 공동굴착에 의해 발생하는 공동의 불안정은 암반에 분포하는 불연속면에 의해 발생한다. 이런 지질구조적인 문제에 의해 발생할 수 있는 파괴양상은 낙반, 전단파괴, 미끄럼, 횡파괴와 같은 것들이 있으며, 이러한 구조적인 문제에 의한 불안정은 록볼트에 의해 효과적으로 보강될 수 있다.¹⁰⁾

일반적으로 공동굴착시 공동벽면 암반은 일축응력상태가 되고 공동의 안정성은 암반의 굴착에 의해 발생하는 응력상태와 암반의 일축압축강도에 좌우되나, 굴착후 공동벽면에 록볼트를 설치하게 되면 암반에 설치된 록볼트는 암반을 하나로 묶어주며 공동주변 암반에 봉압을 증가시켜 암반의 파괴를 억제시킨다. 즉 암반이 스스로의 내력에 의해 안정한 구조물이 되는 것으로 이를 봉압효과라 한다.⁶⁾ 록볼트는 암반에서 다음과 같은 두 가지 방법에 의해 봉압을 발생시킨다. 첫째, 볼트를 설치한 후에 인장하여 볼트 양단 사이의 암반에 봉압을 가하는 방법과 둘째, 선행하중을 가하지 않은 전면접착형 록볼트의 경우에는 굴착에 의해 발생하는 암반변형에 의해 록볼트가 인장됨으로써 발생한다.

3. 록볼트의 역학적 거동

일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 전면접착형 록볼트는 CMC 보강재의 일종으로서 암반-그라우트-록볼트 복합체로서 거동하며, 복합체가 유기적으로 연결되어 거동해야만 보강효과가 보장된다. 전면접착형 록볼트는 록볼트에 발생하는 인장응력에 의해서 뿐만 아니라 록볼트-그라우트 접촉면에서의 미끄럼 파괴에 의해서도 기능을 상실하게 된다. 이런 파괴가 억제되기 위해서는 록볼트-그라우트 접촉면에서 발생하는 전단응력이 접촉면에서의 최대 전단강도보다 작아야 한다. 그동안 여러 학자들에 의해서 전면접착형 록볼트에 발생하는 응력분포가 이론적으로 제시되어 왔으나 각각의 이론하는 그 조건의 한계성 때문에 실제 터널현장에 설치된 록볼트의 응력상황을 정확하게 반영하지 못하고 있다.

또한 터널 수치해석시 일반적으로 사용되고 선형 요소에 의한 평면변형을 조건에서의 터널분석은 선형 요소의 기본가정에 기인한 한계성때문에 그라우트-암반 접촉면에서 발생하는 미끄럼 파괴에 대한 정보를 제공해주지 못하고 있는 현실이다. 따라서 개별 록볼트에 발생하는 응력분포를 분석하기 위해서는 록볼트-그라우트-암반 복합체를 전체적으로 모사할 수 있는 축대칭 조건으로 분석하여야 하므로 본 논문에서는 전면접착형 록볼트에서 록볼트-그라우트재 접촉면에서 발생하는 전단응력과 축응력, 중립점의 위치를 이론식과 축대칭 전산해석을 통하여 분석하여 보았다.

3.1 록볼트에 발생하는 응력분포

Farmer(1975)는 인발내력시험시 탄성볼트에 발생하는 축변위 U_x 와 록볼트-그라우트 접촉면에서 발생하는 전단응력 τ_x 의 분포를 힘평형 조건을 적용하여 식 (1)과 (2)로 표현하였다.¹¹⁾

$$U_x = \frac{\sigma_0}{E_b \alpha} \exp(-\alpha x) \tag{1}$$

$$\tau_x = \frac{1}{2} r_b \alpha \sigma_0 \exp(-\alpha x) \tag{2}$$

여기서, α 는 축력 및 전단응력에 대한 상수로서 $\alpha^2 = \frac{2G_b}{E_b r_b (R - r_b)}$ 로 표현된다. R은 그라우트공의 반경, r_b 는 록볼트의 반경, E_b 는 록볼트의 탄성계수, G_b 는 그라우트재의 전단탄성계수이며, x는 볼트의 길이위치 ($0 \leq x \leq L$)이고 σ_0 는 볼트선단($x=0$)에 가해진 인발력이다.

Farmer가 제시한 전단응력은 굴착벽면에서 최대이고 볼트거리를 따라 지수함수적으로 감소하는 형태를 보여주고 있으나 현장에서 관찰되는 응력분포와는 다르다. 이는 굴착에 의해 암반이 변형되고 암반변형에 의해 볼트의 보강기능이 작동하는 현장조건이 볼트에 인장력을 가함으로써 볼트와 암반에 응력과 변형이 발생하는 조건과 다르기 때문이다. 일반적으로 현장에서 관찰되는 전단응력 분포는 축력의 1차 미분형태가 되기 때문에 축력이 최대가 되는 부분에서 전단응력이 0이 되며, 양방향의 전단응력 방향이 반대가 되는 응력분포가 록볼트에 생기게 된다. 전면접착형 록볼트의 경우 평형조건으로부터 볼트를 지지구간(pick-up length)과 고정구간(anchor length)으로 나눌 수 있다. 지지구간을 따라서 공동 쪽으로 움직이려는 암반을 억제하는 방향의 전단응력이 발생하는 반면, 고정구간을 따라서 반대방향의 전단응력이 발생하여 볼트에 평형을 유지시킨다. 전단응력이 방향을 바꾸는 지점을 중립점(neutral point)이라 하며, 이 지점에서는 암반과 록볼트간의 상대변위는 발생하지 않고 축방향 인장응력은 최대가 된다.

Hyett 등(1996)은 원형공동에서 볼트-그라우트 접촉면에서의 전단응력 τ_x 를 암반과 볼트간의 상대변위의 선형관계로 가정하여 볼트를 강체라는 가정하에 평형조건으로부터 중립점의 위치 ρ 를 식 (3)과 같이 제시하였다.¹²⁾

$$\rho = \frac{L}{\ln\left(\frac{r_0 + L}{r_0}\right)} \tag{3}$$

여기서 L은 록볼트의 길이, r_0 는 원형터널의 반경이다. 따라서 식 (3)에 의하면 중립점의 위치는 볼트길이와 터널반경 만의 함수이다.

3.2 전산 해석

공동굴착에 의해 록볼트에 발생하는 축응력과 록볼트-그라우트 접촉면에서의 전단응력의 분포를 정량적으로 분석하기 위하여 Fig. 1과 같은 지하공동에 설치된 단일 록볼트를 탄성체로 가정하여 유한차분법인 FLAC^{2D} 프로그램의 축대칭 조건으로 분석하였다. 불연속면이 없는 신선한 암반과 불연속면이 공동굴착면에서 0.5 m 위치에 분포하는 경우 축압계수 K_0 를 1로 가정하여 공동의 굴착폭 및 심도를 변화시키면서 록볼트에 분포하는 축응력과 전단응력의 양상과 중립점의 위치를 고찰하였다. 해석에 사용된 암반, 그라우트, 그리고 록볼트의 물성은 Table 1과

Table 1. Material properties of rock mass, grout and rock bolt used in numerical analysis

| | rock mass | grout | rock bolt |
|----------------------------------|-----------|-------|---|
| Young's modulus (GPa) | 5.9 | 7.5 | Young's modulus : 210 GPa diameter : 25 mm |
| Poisson's ratio | 0.25 | 0.1 | |
| unit weight (kN/m ³) | 27 | 10 | |
| cohesion (MPa) | 0.8 | 2.95 | |
| internal friction angle (°) | 25 | 50 | |
| tensile strength (MPa) | 1.02 | 2.1 | |

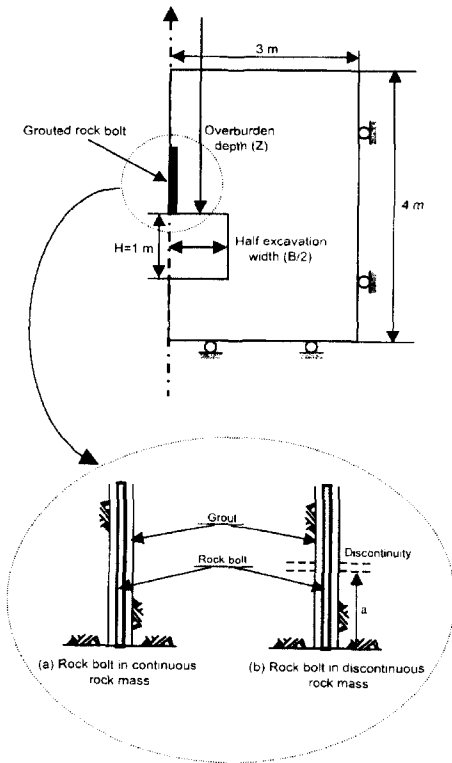


Fig. 1. The model used for the analysis of rock bolt behavior.

같다.

길이 1 m의 록볼트에 대하여 공동의 폭이 1 m, 2 m, 2.7 m인 경우와 공동의 침도가 10 m와 20 m인 경우를 해석하여 단일 록볼트에 발생하는 인장응력 분포, 록볼트-그라우트 접촉면에 발생하는 전단응력 분포와 중립점의 위치를 파악하였다.

또한 록볼트-그라우트 접촉면에서 발생하는 전단응력 τ_x 는 수치해석에서 얻은 변위를 이용하여 식 (4)에 대입하여 계산하였다.¹³⁾

$$\tau_x = \frac{G_g}{R} \cdot \frac{w_1 - w_2}{\ln\left(\frac{R}{r_b}\right)} \quad (4)$$

여기서 w_1 은 볼트의 축변위, w_2 는 그라우트-암반 접촉면에서의 축변위이다.

3.2.1 공동의 폭 B의 영향

무결암에 설치된 록볼트의 경우, 록볼트에 발생하는 축응력과 전단응력은 공동폭의 변화에 의해 분포양상이 달라진다. 공동의 폭이 증가할수록 중립점의 위치가 공동굴착면 반대쪽으로 이동하며 축응력이 최대가 되는 지점 또한 중립점과 같이 이동하였다. 즉 Fig. 2와 같이 공동의 폭을 1 m, 2 m, 2.7 m로 증가함에 따라 중립점의 위치는 공동 굴착벽면에서 32 cm, 56 cm, 60 cm의 깊이로 이동하였으며, 또한 볼트 양단에서 매우 큰 전단응력이 발생하는 반면 다른 곳에서 발생하는 전단응력은 매우 작음을 볼 수 있다.

불연속면을 갖는 암반에 설치된 록볼트의 경우, 록볼트에 발생하는 최대 축응력은 불연속면이 위치한 볼트요소

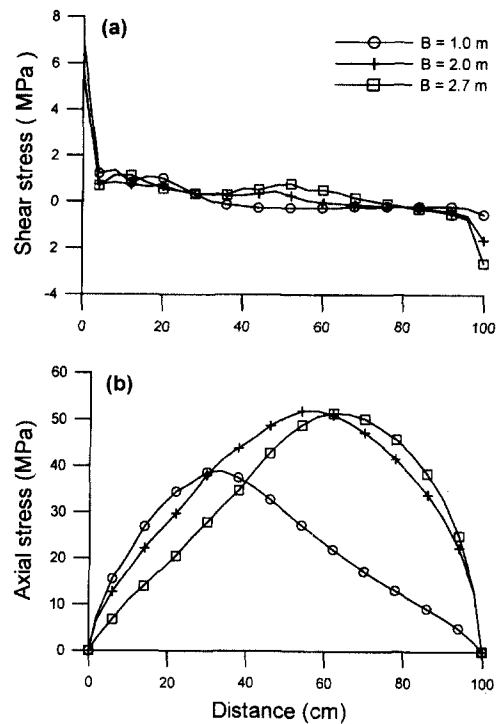


Fig. 2. Variation of shear stress and axial stress of grouted rock bolt for widths of the opening in continuous rock mass. (a) shear stress (b) axial stress

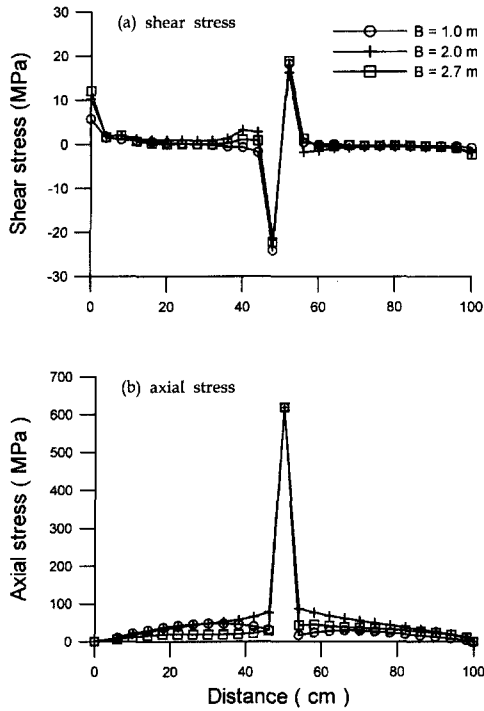


Fig. 3. Variation of shear stress and axial stress of grouted rock bolt for widths of the opening in discontinuous rock mass. (a) shear stress (b) axial stress

에서 발생하며 전단응력 또한 불연속면 위치에서 (+)(-) 최대값을 보였으며 응력방향의 전환이 발생하였다. Fig. 3은 불연속면이 공동굴착면에서 0.5 m 위치에 분포할 때, 록볼트에 발생하는 축응력과 전단응력 분포의 양상을 보여주고 있다. 공동의 굴착폭이 1 m, 2 m, 2.7 m로 변화여도 볼트에 발생하는 최대 인장응력은 불연속면 위치에서 620 MPa로 일정하였으며, 단지 불연속면을 중심으로 볼트양단으로의 인장응력이 약간 증가하였다.

최대 전단응력은 불연속면 주변에서 24 MPa, 21 MPa, 22 MPa로 나타나므로 불연속면이 분포하는 암반에 설치된 록볼트는 불연속면을 관통하는 부분에서 가장 불리한 응력분포를 보임을 알 수 있다. 이것은 불연속면이 록볼트의 응력분포에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 굴착폭의 영향이 상대적으로 작았다고 볼 수 있다.

3.2.2 심도 z의 영향

공동의 심도가 록볼트의 응력분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 공동상단까지의 심도를 10 m와 20 m의 두가지의 경우에 대하여 전산해석을 수행하였다.

신선한 암반에 설치된 록볼트의 경우, 굴착심도의 변화

에 따른 축응력의 분포와 전단응력의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 최대 인장응력과 전단응력의 방향전환이 발생하는 중립점의 위치는 변하지 않았으며, 단지 최대 인장응력의 크기와 볼트 양단에서 발생하는 최대 전단응력의 크기만이 변화하였다. 최대 인장응력은 심도 10 m 공동에서 39 MPa이었던 것이 심도 20 m 공동에서 80 MPa로 증가하였으며, 록볼트-그라우트 접촉면에 발생하는 최대 전단응력은 심도 10 m 공동에서 7 MPa이었던 것이 심도 20 m 공동에서 18 MPa로 증가하였으나, 중립점의 위치는 32 cm로 변화하지 않았다. 따라서 심도는 록볼트에 발생하는 중립점의 위치에는 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

록볼트가 불연속면을 관통하여 설치된 경우, Fig. 5와 같이 공동의 심도가 볼트에 발생하는 축응력과 전단응력에 미치는 영향은 불연속면 위치에서 축응력과 전단응력이 최대가 되며 전단응력의 방향이 전환된다는 사실은 동일하며 신선한 암반에서와 같이 단지 응력의 크기에만 영향을 준다.

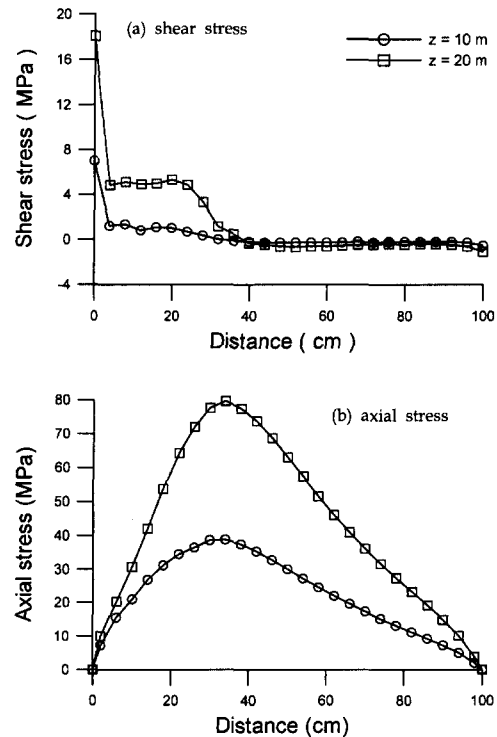


Fig. 4. Variation of shear stress and axial stress of grouted rock bolt for depths of the opening in continuous rock mass. (a) shear stress (b) axial stress

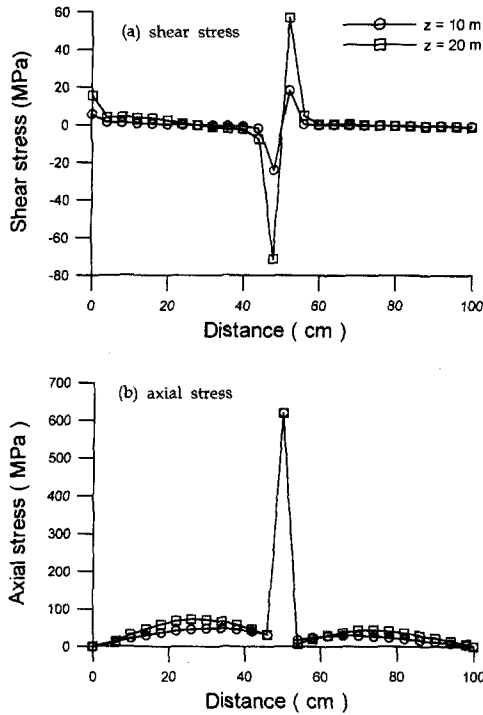


Fig. 5. Variation of shear stress and axial stress of grouted rock bolt for depths of the opening in discontinuous rock mass.

심도가 변하더라도 불연속면에 설치된 록볼트의 경우는 불연속면 위치에서 최대 축응력이 발생하고 전단응력의 방향이 바뀌는 가장 불리한 응력조건을 나타내었으며, 터널의 심도는 단지 록볼트-그라우트 접촉면에서의 전단응력의 크기에만 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 록볼트 보강효과 해석

본 해석에서는 유한요소 해석프로그램 Pentagon^{2D}를 사용하였다. 본 프로그램은 평형방정식 중에서 변위법을 사용하여 외력에 대한 연속체 내부절점의 변위를 우선적으로 구하며, 후처리 과정에서 변형률과 응력을 순차적으로 구한다.¹⁴⁾ 이때 탄소성 해석에 의하여 구조물이 받을 수 있는 응력의 한계를 미리 지정할 수 있으며, 한계를 넘는 경우에는 탄소성 법칙에 따라 그 거동을 탄소성적으로 분석할 수 있다.

2차원에서 평면변형을 조건을 사용하여 암반을 6절점, 8절점 평면변형 고체요소로 해석하였고, 록볼트의 거동을 모사하기 위해 평면의 임의의 위치에 존재하는 선형 보요

Table 2. Material properties used in parametric study

| | rock mass | | rock bolt |
|----------------------------------|-----------|--------|---|
| | type 1 | type 2 | |
| bulk modulus (GPa) | 0.2 | 2 | Young's modulus : 210 GPa diameter : 25 mm |
| shear modulus (GPa) | 0.1 | 1 | |
| unit weight (kN/m ³) | 24 | 25 | |
| cohesion (kPa) | 30 | 250 | |
| internal friction angle (°) | 33 | 35 | |
| tensile strength (kPa) | 30 | 250 | |

소가 사용되었다.

4.1 전산 모델 설정

록볼트의 설치간격, 설치길이에 따른 보강효과를 분석하기 위하여 전산실험을 수행하였다.

록볼트의 보강효과는 각기 다른 보강패턴에 따라 공동 벽면에서 삼축응력이 증가하는 경향, 소성대의 저감경향, 공동 전진에 따른 지반변위의 발생량을 분석함으로써 공동의 크기, 지반조건에 따른 최적의 볼팅패턴을 찾아낼 수 있다. 이런 목적을 이루기 위하여 여러가지 볼팅패턴과 암반물성, 공동의 직경을 변화해 가면서 변수연구를 수행하였다.

전산해석은 평면변형을 조건을 사용하였으며, 공동의 형상은 원형이고 응력조건은 10 MPa의 초기 정수압이 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다. 록볼트의 면적비는 록볼트가 원형공동의 종방향으로 설치간격이 SL이고 횡단면에서 설치간격이 ST로 일정하게 설치되었을 때, 볼팅된 전체 공동벽면 면적에 대한 록볼트의 면적비(rock bolt area ratio)를 백분율로 나타내었다.

해석에 사용된 조건은 2차원 해석의 특성상 SL은 단위 길이 1 m로 고정하고 ST는 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m로 변화시켰으며, 록볼트의 면적비는 0.098%, 0.049%, 0.033%이고 록볼트의 길이는 2 m, 3 m, 4 m, 5 m의 네가지의 경우이다.

$$\text{록볼트의 면적비}(\%) = \frac{\pi r_b^2}{S_L S_T} \times 100 \tag{5}$$

여기서 r_b 는 록볼트의 반경이다. 전산해석에 사용된 록볼트와 암반의 물성은 Table 2와 같다.

4.2 응력증가 경향분석

록볼트의 설치에 의한 공동벽면에서의 응력상태의 변화와 그 증감경향을 분석하였다. 상이한 지반상태에 대한

록볼트의 보강효과를 비교하기 위하여 지반물성을 type 1과 type 2로 구분하였다. Type 1은 type 2에 비해 불량한 지반조건을 갖도록 물성대비(material properties contrast)를 다음과 같이 정하였다. 즉 type 1의 탄성정수는 type 2의 1/10이고 강도정수는 type 2의 약 1/8이 되도록 하였다. 본 비교연구는 이 두가지 지반조건에 대하여 록볼트의 면적비와 길이 및 터널의 직경을 변화시키면서 봉압의 역할을 하는 반경방향 응력의 증가경향을 분석하였다. 여기서 증감경향을 비교하기 위해 응력 증가비(radial stress increase ratio)를 사용하였고 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{응력증가비} = \frac{(\sigma_r)_{\text{after}} - (\sigma_r)_{\text{before}}}{(\sigma_r)_{\text{before}}} \quad (6)$$

여기서, $(\sigma_r)_{\text{after}}$ 는 볼트를 설치했을 경우, $(\sigma_r)_{\text{before}}$ 는 무지보 상태에서의 반경방향 응력이다.

Fig. 6은 록볼트의 길이가 5m일 경우 암종과 면적비에 따른 응력 증가비를 나타내는 것으로서 type 1에서 응력 증가비는 면적비가 0.098일 때 최대 1.83이었다. 지반물성이 같은 경우 공동의 직경이 커짐에 따라 그리고 면적비가 증가함에 따라 응력 증가비는 증가하였다. 즉, 면적비 0.033에서 공동의 직경 6.4m와 10.2m에서의 응력 증가비 차이가 0.25이었던 것이 면적비 0.049에서 0.28, 면적비 0.098에서 0.59로 증가하였다. 이것은 공동의 직경이 커짐에 따라 공동벽면에서 더욱 큰 변위가 발생함을 고려해 볼 때, 지반변위가 발생함에 따라 보강역할을 하는 전면접착형 록볼트의 보강효과 경향과 일치한다고 할 수 있다. Type 2에서는 응력 증가비가 면적비 0.098에서 0.33으로 type 1에 비해 1.5만큼 작았다. 이것은 지반의 물성이 나뉘수록 록볼트에 의한 응력증가는 커짐을 나타내는 것이다. Type 2에서도 공동의 직경이 커짐에 따라 응력 증가비 차이는 커졌는데, 그 차이는 공동의 직경 6.4m와 10.2m에서 면적비 0.033에서 0.02이었던 것이 면적비 0.049에서 0.03, 면적비 0.098에서 0.12로 증가하였다.

4.3 소성대감소 경향분석

본 해석에서는 암반의 물성, 공동의 직경, 록볼트의 설치간격, 록볼트의 길이를 변화시키면서 소성대의 감소효과를 비교하였다. 암반을 완전 탄소성거동을 하는 재료로 간주하고 선형 Mohr Coulomb 파괴기준식을 사용하여 탄소성해석을 수행하였다. 본 해석에서는 현장의 3차원

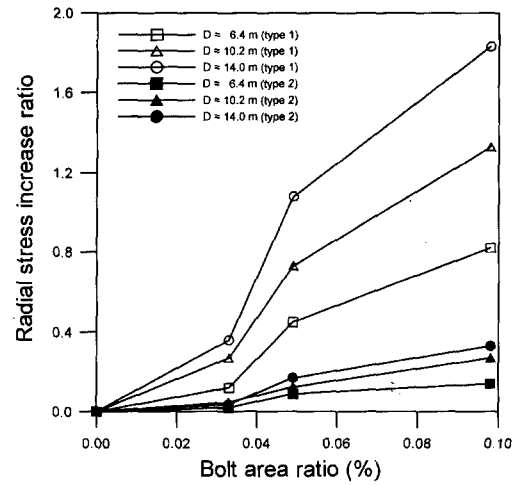


Fig. 6. Variation of radial stress increase ratio with the increase of bolt area ratio.

응력조건을 반영하기 위하여 하중분담률 개념을 도입하여 분석하였고, 록볼트의 설치시점은 굴착에 의한 공동벽면에서의 굴착 상당력이 40% 해방된 시점에서 설치한 것으로 해석하였다.

Table 3은 원형공동을 굴착하였을 때 각기 다른 암종과 록볼트 면적비에 따라 발생하는 소성대 반경을 나타내었으며, Fig. 7은 소성대 감소비의 변화를 보여 주고 있다. Fig. 7에서 소성대 감소의 상대적 크기를 비교하기 위하여 소성대 감소비(plastic zone reduction ratio)를 사용하였다.

$$\text{소성대 감소비} = \frac{(r_p)_{\text{after}} - (r_p)_{\text{before}}}{(r_p)_{\text{before}}} \quad (7)$$

여기서, $(r_p)_{\text{after}}$ 는 록볼트 설치에 의해 감소된 공동벽면으로부터 소성대 거리, $(r_p)_{\text{before}}$ 는 무지보 공동에서 발생한 공동벽면으로부터의 소성대 거리이다.

공동 직경이 6.4m인 경우, 무지보 상태에서 발생한 소성대 거리는 type 1에서 3.6m, type 2에서 2.6m이었던 것이 록볼트의 설치에 의해 상당히 감소하였는데 그 감소비는 면적비가 클수록, 지반물성이 나뉘수록 증가하였다. 즉, type 1에서 소성대 거리는 면적비 0.098에서 0.6m로 소성대 감소비는 0.83이었으나 type 2에서는 소성대 감소비는 0.45이었다.

공동 직경 10.2m인 원형공동을 굴착하였을 때 또한 지반물성에 따라 발생하는 소성대의 크기가 록볼트의 설치에 의해 감소된다. 무지보 상태에서 발생한 소성대 거리는 type 1에서 4.0m, type 2에서 5.6m에서 6.5m

Table 3. The plastic zone radius resulted from elastic-plastic analysis

| | rock bolt area ratio (%) | plastic zone radius | | |
|--------|--------------------------|---------------------|------------|------------|
| | | D = 6.4 m | D = 10.2 m | D = 14.0 m |
| type 1 | unsupported | 3.6 m | 6.5 m | 9.2 m |
| | 0.033 | 1.6 m | 3.0 m | 4.0 m |
| | 0.049 | 1.1 m | 2.0 m | 3.2 m |
| | 0.098 | 0.6 m | 1.0 m | 1.6 m |
| type 2 | unsupported | 2.6 m | 5.6 m | 7.8 m |
| | 0.033 | 2.0 m | 3.4 m | 4.5 m |
| | 0.049 | 1.7 m | 2.7 m | 3.6 m |
| | 0.098 | 1.1 m | 1.8 m | 2.6 m |

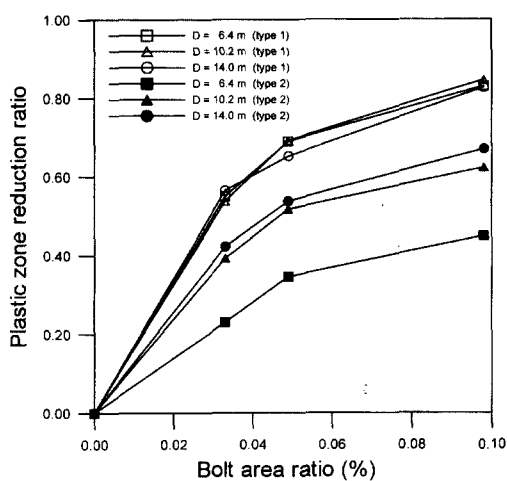


Fig. 7. Variation of plastic zone reduction ratio with the increase of bolt area ratio.

있던 것이 록볼트의 설치에 의해 상당히 감소하였는데 그 감소비는 면적비가 클수록, 지반물성이 나뭇수록 증가하였다. 즉, type 1에서 소성대 거리는 면적비 0.049에서 2.06 m으로 감소비는 0.69이었으나 type 2에서는 0.5이었다. 공동 직경 14.0 m인 원형공동을 굴착하였을 때에도 직경 6.4 m, 10.2 m의 공동을 굴착했을 경우와 마찬가지로 지반물성에 따라 발생하는 소성대의 크기가 록볼트의 설치에 의해 감소되었다.

그러나 공동 직경에 따른 록볼트의 소성대 감소효과는 무지보 상태에서는 소성대가 공동의 직경이 커짐에 따라 증가하는 경향과는 달리 공동직경에 따른 소성대 감소비는 type 2에서는 공동 직경에 따라 증가하였으나 type 1에서는 공동직경에 따른 증가나 감소라는 뚜렷한 경향을

나타내지는 않았다.

4.4 지반변위감소 경향분석

본 해석에서는 변위 감소량의 상대적 크기를 비교하기 위하여 식 (8)과 같이 정의된 변위 감소비(displacement reduction ratio)를 사용하였다.

$$\text{변위 감소비} = \frac{|(u_r)_{\text{after}} - (u_r)_{\text{before}}|}{(u_r)_{\text{before}}} \quad (8)$$

여기서 $(u_r)_{\text{after}}$ 는 록볼트 설치에 의해 공동벽면에서 발생한 감소된 최종변위, $(u_r)_{\text{before}}$ 는 무지보공동의 벽면에서 발생한 최종변위이다.

Fig. 8은 변위감소비를 그래프로 표현한 것으로서 록볼트의 지반변위 억제효과는 면적비가 증가함에 따라, 지반물성이 나뭇수록 증가하였으나 면적비 증가에 따른 증가 경향은 완만하였다. 변위 감소효과는 소성대 감소효과에서는 달리 공동의 직경이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 공동직경이 6.4 m, 10.2 m, 14.0 m으로 증가함에 따라, type 1에서 면적비가 0.033인 경우 지반 변위 감소비가 각각 0.7, 0.8, 0.84로 증가하였으며 type 2에서 면적비가 0.049인 경우 각각 0.66, 0.84, 0.87로 증가하였다.

5. 결론

본 연구에서는 지하구조물의 대표적인 형태인 터널건설

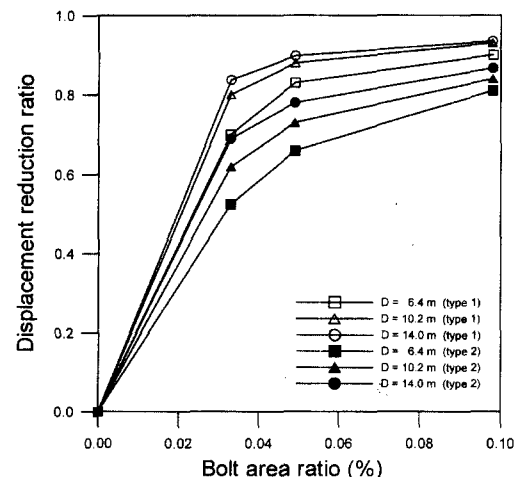


Fig. 8. Variation of displacement reduction ratio with the increase of bolt area ratio.

에 있어서 안정성 향상을 목적으로 사용되고 있는 록볼트의 역학적 거동을 이론해와 전산해석을 이용하여 분석하였다. 지하공동에 설치된 단일 록볼트의 경우 공동의 폭과 심도 및 불연속면이 축응력 분포, 전단응력 분포 및 중립점의 위치에 미치는 영향을 분석하였고 여러가지 지반조건과 록볼트의 설치간격, 설치깊이, 공동의 직경 등이 보강효과에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 록볼트의 최대 인장응력은 중립점에서 나타났으며 록볼트-그라우트 접촉면에서의 전단응력은 중립점을 중심으로 공동벽면쪽은 지지구간으로서 암반의 변형을 억제시키는 (+)의 전단응력이, 반대쪽은 고정구간으로서 응력평형을 유지하는 (-)의 전단응력이 발생하였다. 중립점의 위치에 영향을 주는 인자는 공동의 폭이며, 공동의 심도는 중립점의 위치에 영향을 주지 못하였다.

(2) 록볼트가 불연속면을 통과하여 설치된 경우, 록볼트-그라우트 접촉면에서 전단응력은 불연속면에서 0으로 나타났으며 인장응력은 최대값이 되었다. 또한 불연속면 주변에서 최대 전단응력의 방향전환이 발생하는 등 불연속면 주변에서 가장 불리한 응력상태가 나타났다. 공동의 폭은 록볼트에 발생하는 응력분포에 큰 영향을 주지는 못한 반면에 심도가 클수록 불연속면 주변에 발생하는 최대 전단응력은 증가하였다.

(3) 굴착에 의한 공동벽면의 일축응력상태를 삼축응력상태로 만드는 록볼트의 봉압효과는 type 2에서보다 type 1에서, 즉 지반물성이 나뉘수록 크게 나타났으며, 공동의 직경이 크고 록볼트의 설치간격이 작을수록 증가하였다. 록볼트의 소성대 감소효과 역시 type 2에서보다 type 1에서 뚜렷이 나타났으며, 록볼트의 설치간격이 작을수록 소성대 감소효과는 증가하였다. 무지보 공동에서 공동의 직경이 커짐에 따라 소성대가 증가하였으나 소성대 감소비에는 큰 변화가 없었다.

록볼트의 변위 감소효과는 type 2에서보다 type 1에서 크게 나타났으며, 공동의 직경이 크고 볼트의 설치간격이 작을수록 변위 감소효과는 증가하였다. 따라서 암질이 나뉘수록 록볼트에 의한 보강이 효과적이며, 안정성 및 경제성 등을 고려하여 록볼트의 설치간격을 결정하여야 한다. 록볼트의 보강효과는 여러 가지 조건에 따라 달라질 수 있으므로 본 연구의 결과는 보강효과의 절대적 평가 기준이 아닐지라도 동일한 조건내에 각각의 영향을 예측함으로써 경제적인 보강설계에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 1998년 한양대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Sakurai, S. and Kawashima, I., 1992, Modelling of jointed rock masses reinforced by rock bolts, Proc. of the Int. Symp. on Rock Support, 547~550.
2. Yu, T. Z. and Xian, C. J., 1983, Behaviour of rock bolting as tunnelling support, Proc. of the Int. Symp. on Rock Bolting, Abisko, 87~92.
3. 김호영, 이회근, 1991, 전면접착형 록볼트의 지보거동 : 이론적 수식화와 경제요소해석에 대한 고찰, 터널과 지하공간, Vol. 1, No. 2, 168~180.
4. Windsor, C. R., 1997, Rock reinforcement systems, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 34, No. 6, 919~951.
5. Choquet, P. and Hadjigeorgiou, J., 1993, The Design support for underground excavations, Comprehensive Rock Engineering (Edited by J. A. Hudson), Pergamon, Oxford, Vol. 4, 313~348.
6. Bischoff, J. A. and Smart, J. D., 1975, A method of computing a rock reinforcement system which is structurally equivalent to an internal support system, Proc. of the 16th US Symp. on Rock Mech., 114~119.
7. Indraratna, B. and Kaiser, P. K., 1990, Analytical model for the design of grouted rock bolts, Int. J. Numer. & Analyt. Methods in Geomech., Vol. 14, 227~251.
8. Obert, L. and Duvall, W., 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley & Sons, New York, 650 p.
9. Hu, Y., 1997, The buckling failure analysis of a cavern in jointed rock, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 34 : 3-4, Paper No. 113a
10. Aydan, O. and Kawamoto, T., 1992, Shear reinforcement effect of rockbolts in discontinuous rock masses, Proc. of the Int. Symp. on Rock Support, 483~489.
11. Farmer, W., 1975, Stress distribution along a resin grouted rock anchor, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 12, 347~351.
12. Hyett, A. J., Moosavi, M. and Bawden, W. F., 1996, Load distribution along fully grouted bolts, with emphasis on cable bolt reinforcement, Int. J. Numer. & Analyt. Methods in Geomech., Vol. 20, 517~544.
13. Christopher, M. and David, E., 1983, Rockbolts : A new numerical representation and its application in tunnel design, Proc. of the 24th U.S Symp. on Rock Mech., 13~25.
14. Pentagon2D, Pentagon3D Manual, 1998, EMERALD SOFT.

정 해 성



1993년 한양대학교 공과대학 자원
공학과 졸업
1999년 한양대학교 대학원 자원공
학과 공학석사

Tel : 02-528-9765

현재 (주) 동명기술공단 근무

문 현 구



1974년 서울대학교 자원공학과 졸업
1983년 University of Utah 공학
석사
1987년 University of Utah 공학
박사

Tel : 02-2290-0413

E-mail : hkmoon@email.hanyang.ac.kr

현재 한양 대학교 공과대학 시스템응용공학부 교수
