

록볼트 긴장에 의한 수평절리암반의 보강효과

안정환^{1)*}, 이상덕²⁾

Reinforcing Effect of Pre-Tensioned Rock Bolts in the Jointed Rocks Condition

Joung-Hwan An and Sang-Duk Lee

Abstract Rock bolt is one of the most important supports for tunnelling to prevent excessive ground relaxation at the primary tunnel excavation stage. It forms a ground arch band by confining the ground around a tunnel. Rock bolt has various effects, such as support or hanging effect, internal pressure effect, arching effect, ground improvement effect etc. Most studies on rock bolt focused on the concept of support, but only a few researches on the ground reinforcing effect by pre-tensioning a rock bolts. In this study, large scale model tests are performed to investigate the ground reinforcing effect of rock bolts for regularly jointed rocks. Simple beam model was built to find out the reinforcing effect of jointed rocks, which was reinforced by pre-tensioned rock bolts. Settlement of model beam was analyzed through measuring its sagging for various installation intervals.

Key words Simple beam model test, Pre-tension and installation intervals of rock bolts, Reinforcing effect

초 록 록볼트는 지하공동 굴착시 암반의 과도한 이완을 초기에 방지할 수 있는 가장 중요한 터널 지보재 중 하나이다. 국내외에서 록볼트의 설치에 따른 침하저감 및 보강효과, 다양한 록볼트 형태에 따른 터널 안정성 증대효과 등 록볼트 지보효과에 대한 많은 연구는 있으나, 록볼트에 긴장력을 가함으로써 절리암반의 지반보강 효과에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 수평절리암반을 모사한 모형지반에서 록볼트의 긴장력 및 설치간격을 변수로 하여 대형모형실험을 실시하여, 록볼트에 의한 지반 보강효과를 확인하였다. 록볼트의 긴장력에 의한 절리암반 보강효과를 확인하기 위하여 단순보를 조성하여 긴장력과 설치간격을 변수로 하였다. 굴착에 따른 모형지반 중앙하부 처짐량을 측정하여 록볼트로 보강된 보강영역의 지반변형계수를 도출하였다.

핵심어 단순보 실험, 록볼트의 긴장력 및 설치간격, 지반변형계수

1. 서 론

터널을 비롯한 지하구조물의 건설이 필요와 요구에 의해 증가하면서 여러 기술이 도입되고, 활발한 개발이 이루어져 왔다. 지하구조물 건설은 초기에 대부분 목재를 지보로 이용하여 건설되었으나, 19세기 후반이후 급격한 산업화로 터널의 수요가 증가되어 지보재로 이용되는 목재가 막대하게 소비되는 문제가 발생하였다. 기존터널굴착 방법에 의해 발생하는 문제를 해소하기 위한 노력의 결과 20세기에 들어서며 원지반을 지지체로

인식하는 개념이 보급되고, 원지반 지지체의 형성을 돕는 슛크리트와 록볼트가 개발되어 광산과 같은 터널굴착에 적용한 결과 목재지보에 비하여 매우 우수한 지보효과를 발휘한다는 것이 확인되었다(Kovari, 1994). Rabcewicz (1964)는 가급적 얇고 유연한 1차 라이닝을 굴착직후 가능한 빨리 적용하여 약간의 변형을 허용함으로써 지반자체의 변형저항력을 최대한 발휘시켜 원지반이 지지체로서의 역할을 하도록 하는 NATM공법을 제안하였다. 노르웨이에서는 원지반의 지지능력을 최대로 활용하고 1차지보재로 보강하여 터널을 장기적으로 안정시키는 NATM의 개념과 일치하지만 고강도의 록볼트를 주지보재로 하고 일반 슛크리트 대신 점착력이 양호한 고강도의 강섬유 보강 습식콘크리트를 사용하여 주변암반과 일체화하는 지보공법인 NMT공법을 개발하여 사용중이다(김성수 등, 2003).

터널의 지보는 굴착주변지반이 자체의 지지력을 발휘

¹⁾ 정회원 (주)동호 지반공학부 상무

²⁾ 정회원 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

* 교신저자 : jwan@dongho.co.kr

접수일 : 2009년 9월 7일

심사 완료일 : 2009년 9월 24일

게재 확정일 : 2009년 9월 29일

하고 유지할 수 있도록 하는 것으로 주요 지보공법으로는 숏크리트와 록볼트가 있다. 숏크리트는 암반의 절리나 불규칙한 요철을 채워 굴착주변 원지반을 안정성 확보에 우수한 폐합된 원이나 아치형의 부재로서 구조적인 역할을 하도록 한다. 록볼트는 내측에서 지반을 구속하여 암반자체의 지보능력을 이용한다. 록볼트의 주요기능은 암괴의 낙반을 방지하는 매달림 또는 봉합효과, 층리나 절리면의 전단응력을 전달하여 합성빔을 형성하는 빔형성효과, 시스템 볼팅에 의한 내압효과로 지반아치 형성효과, 볼트의 그라우팅이나 선단 정착에 의한 지반보강효과 등이 있다.

록볼트는 암반이 지니고 있는 잠재적인 결함을 보강하고 암반이 가지고 있는 지내력을 증가시키는 역할을 한다. 록볼트는 굴착 즉시 시공하여 암반의 이완을 초기에 방지하고, 불연속면의 활동을 억제하여 지하공동 굴착시 불안정한 암반거동을 억제함으로써 안전한 시공에 필수적이며, 경제적인 뿐만 아니라 공동의 단면을 자유롭게 선택할 수 있다는 장점 때문에 많이 활용되어 왔다(정해성 등, 1999). 그러나 아직까지 보강효과에 대한 정량적인 분석이 이루어지고 있지 않으며, 실제 터널건설에 있어서 아직도 경험적인 방법을 많이 사용하고 있는 실정이다. 단지 수치해석에 의하여 경험적으로 설계된 터널지보방법에 대하여 허용응력 검토를 통해 안정성 여부만을 판단하고 있다.

상기한 바와 같이 록볼트에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 주로 록볼트 보강에 따른 터널 내공변위 또는 지보재 응력의 감소효과 등의 분석이 주로 이루어지고 있으며, 록볼트 보강에 의한 원지반 지지체의 강도증가에 대한 관심은 소수에 불과하다. 특히 절리 암반에서의 봉합을 위해 사용되어지는 프리스트레스(pre-stress) 록볼트의 효과에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 기술자들은 정확한 이해 없이 경험에 의해 록볼트를 설계·시공하고 있으며 프리스트레스의 크기를 결정짓고 있는 현실이다. 터널시공 시 대부분 록볼트가 사용되고 있고, 설계 및 시공이 주로 경험에 의존하고 있는 점을 감안하면, 현재 터널건설이 안정성의 확보와 공사비의 책정에서 불확실한 요소에 의해 많이 이루어지고 있다고 판단할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 록볼트 보강에 대하여 원지반 보강의 개념으로 접근하여 록볼트 보강영역의 지반강도 증가효과를 고찰함으로써, 록볼트에 긴장력을 도입할 경우 보강효과를 정량적으로 제시하여 합리적인 설계가 이루어지도록 하는 데 근거를 제공하고자 한다.

2. 록볼트의 역할 및 거동특성

암반의 균열 등 역학적으로 불연속면의 상태가 터널 거동을 지배하는 경암지반에서는 록볼트가 개개의 암반을 지지하고 있어 암반의 일체성을 높이는 효과가 있다. 연암암반의 경우 터널주변의 암반이 소성화하는 단계에서 내공변위를 구속하면 암반을 삼축응력상태로 유지하고 굴착면 주변 암반의 내하 능력을 높이는 작용이 주로 이루어진다.

터널굴착에 의한 응력재분배가 암반강도를 초과하면 터널 벽면부근의 암반은 소성화하지만 록볼트는 숏크리트 등의 다른 지보부재와 일체로 되어 암반을 삼축응력 상태로 유지하고 소성영역의 내하력 감소를 방지하여 터널을 안정시킨다. 이때 록볼트에 미리 인장응력을 도입해 놓으면 암반에 삼축응력상태를 만들기 쉽다. 록볼트를 설치한 암반이 터널을 안정시키는데 필요한 내하력이 부족할 경우에는 소성영역이 확대되고 내공변위가 증대하지만 이 경우에 록볼트는 암반을 일체적으로 유지하면서 큰 변형을 허용하여 암반이 그 내하력을 확실히 발휘하도록 돕는 기능이 있다.

강재, 목재 또는 숏크리트로 지보한 터널은 지보부재의 취약부에서 파괴(또는 항복)되고 이에 따라 지지력이 감소되어 변형이 발생한다. 반면에 볼트는 숏크리트에 비해 변형억제 능력은 작지만, 변형이 매우 커져도 강성저하가 작고 전체가 같은 모양을 유지하면서 변형되기 때문에, 볼트로 보강된 원지반 지지력은 변형이 진행되더라도 내하력이 부분적으로 저하되는 일이 거의 없다. 따라서 매우 큰 토압을 받더라도 터널의 형상을 유지한 채 안쪽으로 밀려 나오게 된다.

그림 1은 지반응력과 지보재의 상관관계를 도시한 것

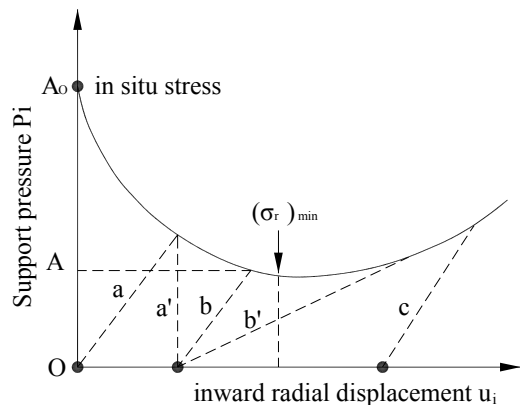


그림 1. 지반응력과 지보재의 관계

이다. 터널을 굴착하면 내공변위가 발생하게 된다. 굴착면의 변위를 허용하면 변위가 증가하면서 반경방향으로 작용하는 하중은 감소하나 어느 한계변위를 넘으면 지반은 이완되고 이완하중의 영향으로 반경방향의 응력은 오히려 증가하게 되므로 지보재를 설치하여 내공변위의 발생을 억제시켜야 한다.

지보재가 강하면 부담하는 응력이 커져 비경제적이 되며(a'), 너무 약하면 변형이 과다해져 위험을 초래하게 된다(b'). 설치시기가 너무 늦으면 이완하중이 작용하여 변위가 증가한다(c). 따라서, 지반자체의 지보능력을 최대한 활용하기 위해서는 적절한 시기에 적절한 강성의 지보를 설치하는 것이 필요하다(b).

록볼트는 역학적인 관점에서 보면 지보재로 보기보다는 지반자체의 보강재로 보는 것이 더 합리적일 수 있다. 일반적으로 록볼트의 설치로 인하여 록볼트의 길이만큼인 $r = R_{r,f}$ 까지 지반의 강도가 증대되는 것으로 본다(그림 2(a)).

강도증진 효과의 가장 중요한 원리는 볼트의 설치로 인하여 취성(brittle)현상을 보이던 암반이 연성(ductile) 현상을 보여 파괴점에 이른 후에도 강도가 저하되지 않

는다는 점이다. 또한 록볼트에 작용되는 축력으로 인하여 지반에 $\Delta\sigma_r$ 의 구속압을 증가시켜 주는 효과도 발생한다(그림 2(b)). 구속압의 증가량 $\Delta\sigma_r$ 은 록볼트의 축력으로부터 식 (1)과 같이 구한다.

$$\Delta\sigma_r = \frac{T_{mean}}{s_t \cdot s_l} \tag{1}$$

- 여기서, $\Delta\sigma_r$: 구속압의 증가량
- T_{mean} : 록볼트의 평균축력
- s_t : 록볼트의 횡방향 간격
- s_l : 록볼트의 종방향 간격

3. 대형모형실험

3.1 실험개요

모형실험의 크기는 실제에 가까울수록 치수효과(scale effect)에 의한 영향이 적게 발생한다. 그러나, 대부분 실험실에서 취급이 용이한 크기로 실험하고, 치수효과를 고려하여 실제에 가까운 결과를 구하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 직경 10 m 터널에서 터널천단 120°를 록볼트로 보강하는 것으로 가정하였고, 록볼트가 보강

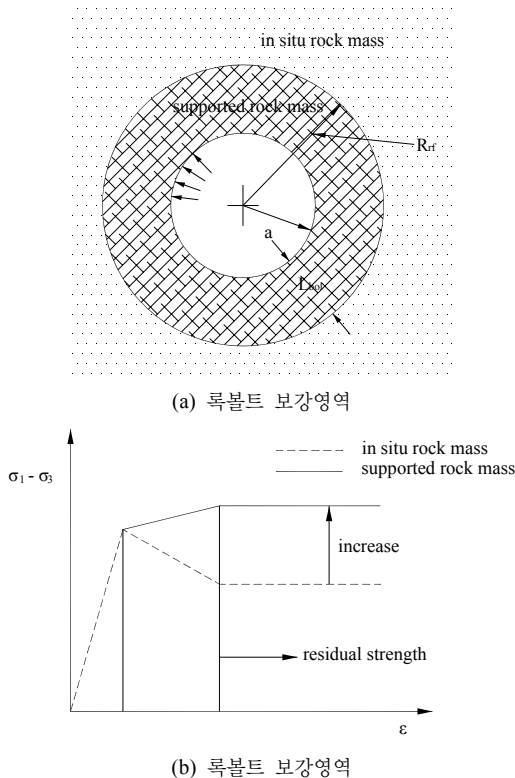


그림 2. 록볼트에 의한 지반보강

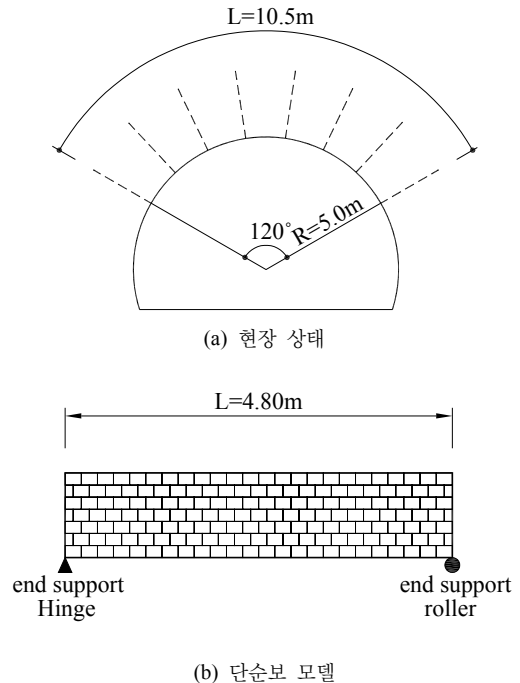


그림 3. 모형실험 규모

된 보강영역의 길이 10.5 m를 기준으로 1/2 축소모형 (길이 4.8m)의 대형모형실험을 수행하여 치수효과에 따른 신뢰성이 높아지도록 하였다.

록볼트 설치간격과 긴장력을 변수로 하였으며, 긴장력을 가한 록볼트를 설치한 후 하부지반을 굴착하여 록볼트 보강 지지빔의 침하량을 측정하여 지반보강효과를 확인하였다.

3.2 모형지반 및 지보재

그림 4는 실험기의 형태와 모형지반의 조성상태를 보여준다. 모형지반은 0.2 m(길이)×0.15 m(높이)×0.45 m(폭)크기의 168개 블록을 쌓아 4.8 m(길이)×1.05 m(높이)×0.45 m(폭)의 규모로 조성하였다. 모형지반 하부에는 모래를 이용하여 굴착이 용이하도록 제작하였다. 슛크리트는 15 mm의 철판으로 대체하였고, 모형지반과 굴착지반 사이에 설치하여 하부 굴착지반 제거시 록볼트와 함께 상부 모형지반을 지지하도록 하였다. 모형지반 좌측지점은 힌지, 우측지점은 롤러조건을 갖도록 하여 굴착시 지지빔이 단순보로 거동하도록 하였다. 록볼트는 철판과 모형지반이 결합되도록 설치하며, 볼트를

조여서 긴장력을 가하였다. 대형모형시험의 모형지반에 대하여 일축압축시험, 절리면전단시험을 통해 산정된 지반 및 재료의 강도정수는 표 1과 같으며, 모형지반의 RMR 분류 결과는 표 2와 같다. 록볼트와 라이닝 지보재 물성치는 표 3과 같다.

3.3 모형실험

블록을 쌓은 후에 슛크리트와 록볼트를 설치하여, 록볼트의 긴장력이 가해진 상태에서 하부모래지반을 굴착하여 록볼트 설치간격과 긴장력에 따른 모형지반보의 침하를 측정하였다.

록볼트 보강 후 단순보의 처짐으로부터 지반물성을 환산하여 지반의 보강효과를 분석하였다.

본 연구에 적용한 지지빔의 크기를 H=1.05 m로 고정하고, 록볼트의 긴장력과 설치간격을 변수로 하였다. 록볼트 간격은 0.8 m(6개보강_6R), 0.6 m(8개보강_8R), 0.4 m(12개보강_12R)의 3개 경우와 긴장력(P)에 따라 5, 10, 15, 20, 25, 30 kN 6개 경우 및 무보강(RN)의 총 17개 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 또한 각 실험 CASE에 대하여 지반굴착후 중앙부에 집중하중을 5,

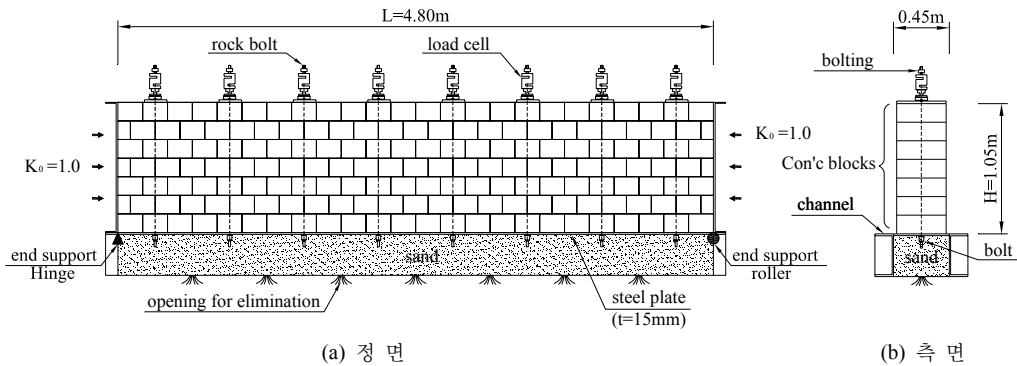


그림 4. 시험장치(단위 : m)

표 1. 모형지반 강도정수

구 분	단위	적용값
단위중량	kN/m ³	20.0
일축압축강도	MPa	18.9
절리마찰각	(°)	37
절리점착력	MPa	0
RQD	%	100

표 2. 모형지반의 RMR 분류

구 분	범위	적용값
암석강도	5 ~ 25 MPa	2
RQD	90 ~ 100%	20
불연속면 간격	60 ~ 200 mm	8
불연속면 상태	매우거침	20
지하수 상태	완전 건조	15
불연속면 각도	0°	0
RMR		65

표 3. 지보재 물성치

구 분	록볼트	스�크리트
재 질	Steel bar	Steel Plate
단위중량	78.5 kN/m ³	78.5 kN/m ³
탄성계수	200,000 MPa	200,000 MPa
규 격	d=15 mm	t=16 mm

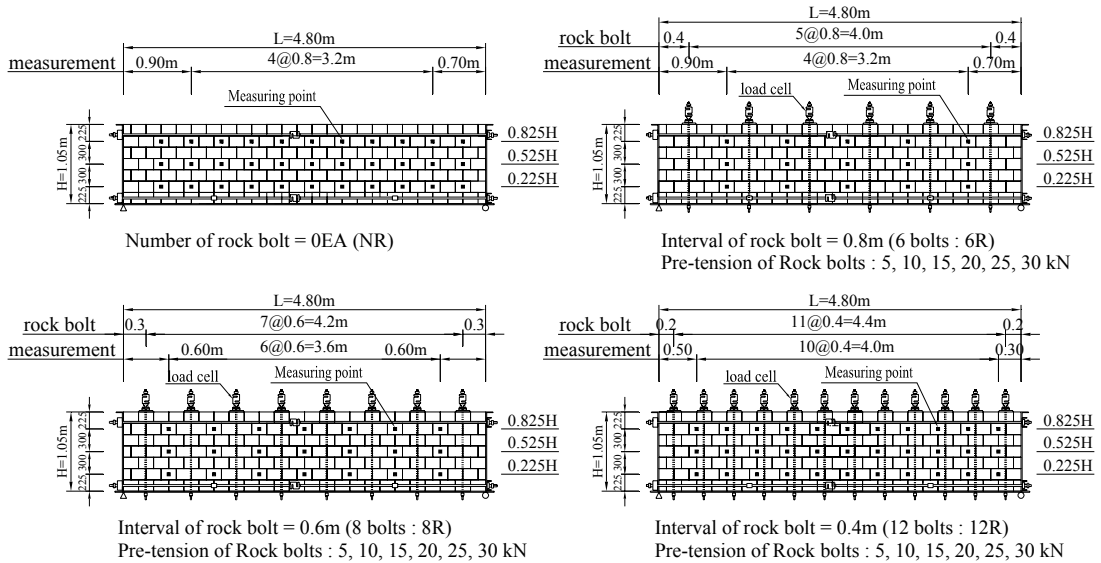


그림 5. 모형실험 종류 및 계측위치

10, 20, 30, 40, 50, 70 kN으로 재하하였다. 모형실험의 종류 및 측정위치는 그림 5와 같다.

실험은 다음과 같은 순서에 의하여 진행하였다.

- ① 자연건조된 모래를 사용하여 샌드커튼방식으로 균질한 모래지반 조성
- ② 단순보의 양단지지조건을 만족하도록 강판을 모래위에 설치
- ③ 콘크리트 블록을 이용하여 지지빔을 조성하고 록볼트 설치
- ④ 계측기 설치 및 록볼트 긴장력 재하
- ⑤ 단순보 상태가 되도록 하부 모래지반 제거
- ⑥ 중력으로 발생하는 지지빔의 침하, 록볼트 축력, 슛크리트 응력 측정

4. 실험결과

4.1 굴착에 따른 침하발생 현황

침하량을 측정한 결과는 그림 6과 같다. 침하는 록볼트의 설치개수가 적을수록 지지빔 중앙부에서 가장 크며, 단순보 침하형태에 가장 근접하게 나타난다. 록볼트 간격이 촘촘한 12R의 경우 그림 7에서와 같이 록볼트에 의해 구속되는 블록의 중첩영역이 증가하면서 약간 불규칙한 침하형태를 보이고, 침하는 가장 작게 나타난다. 모든 경우에 있어서 록볼트의 긴장력이 증가되고 록볼트 간격이 좁아질수록 침하량은 작아졌다.

4.2 록볼트 긴장력에 따른 보강효과

록볼트에 5, 10, 15, 20, 25, 30 kN의 긴장력에 따라 모래지반을 제거하면서 발생하는 침하량은 그림 8(a)에 나타내었다.

록볼트의 긴장력이 증가하면 록볼트 설치간격에 따라 정도에는 차이가 있으나 침하량은 감소하는 것을 볼 수 있다. 록볼트 긴장력에 따른 침하량 감소는 록볼트 설치간격이 좁을수록 즉, 설치개수가 많을수록 작은 긴장력에서 침하량 감소효과가 크게 나타났다. 록볼트의 긴장력과 침하량의 관계는 로그함수의 형태를 나타낸다.

록볼트를 설치함에 따라 지지빔의 강도가 증가하고 침하량이 감소하는 것을 알 수 있다. Oreste (1996)의 연구결과에 따르면 록볼트의 축력으로부터 지반의 구속압이 증가되어 전단강도가 증가되며, 전단강도 증가 효과가 점착력을 증가시키는 것으로 가정하였다. 김상환(2005)은 터널주변지반의 복합거동을 이론적 및 실험적으로 증명하였는데, 록볼트의 보강이 주변지반에 있어서 내부마찰각 보다 점착력의 증가에 많은 영향을 미친다고 하였다.

본 연구에서는 록볼트로 보강한 지지보의 굴착에 의한 침하량을 측정하여 침하와 연관성이 큰 지반변형계수와의 상관관계를 분석하였다. 지반변형계수는 지지빔을 단순보로 가정하고 자중에 의한 침하량을 이용하여 산정하였다. 단순보 침하량으로부터 긴장력이 없는 상태의 지반변형계수를 산정한 결과 88 MPa로 나타났다.

그림 8(b)는 록볼트의 긴장력에 따라 실험시 측정된

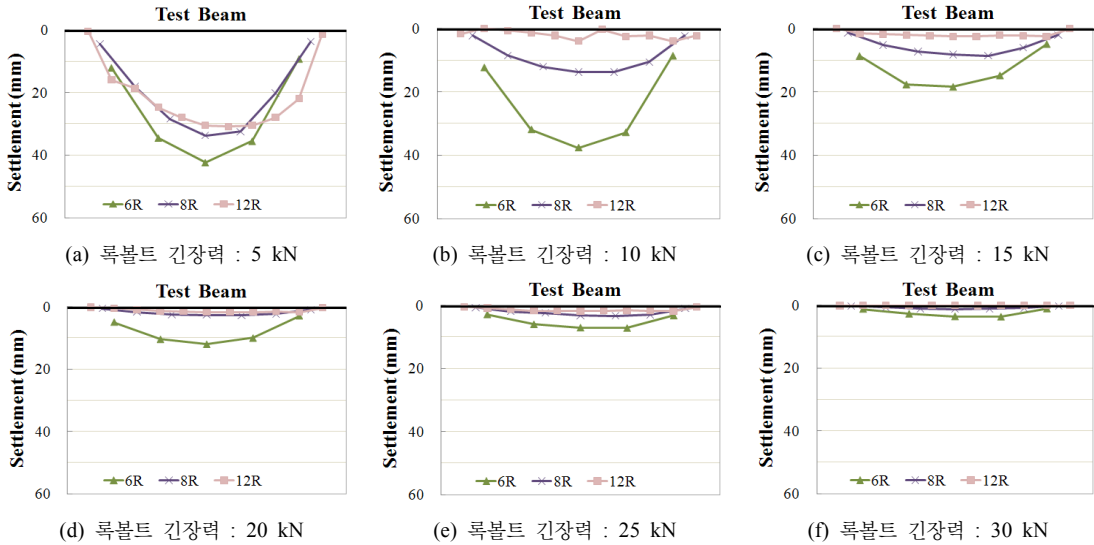


그림 6. 실험종류에 따른 침하경향

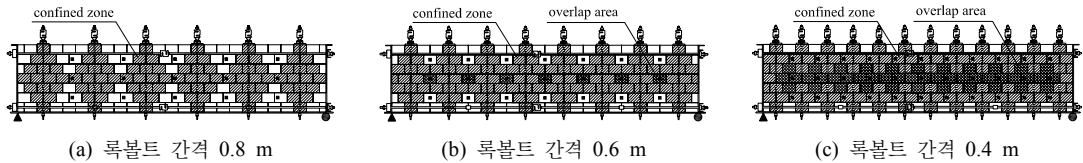
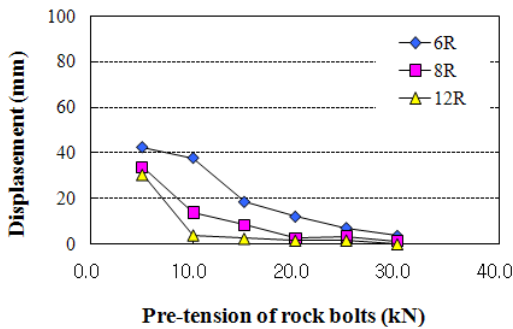
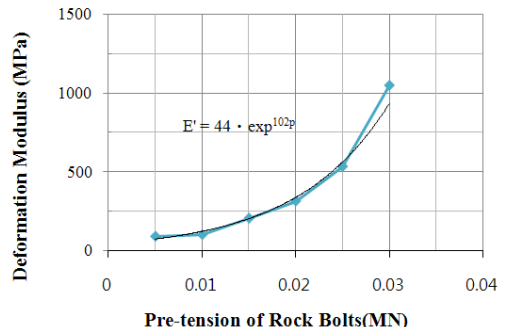


그림 7. 블록의 중첩효과



(a) 록볼트 긴장력에 따른 침하량



(b) 록볼트 긴장력과 지반변형계수와와의 상관관계

그림 8. 록볼트 긴장력에 따른 보강효과

침하량을 기준으로 산정된 지반변형계수이다. 지반변형계수는 록볼트의 긴장력과 상관관계를 나타내며, 회귀분석결과 $E' = 44 \cdot \exp^{102P}$ 로 나타났다. 긴장력이 없는 록볼트보강 지반변형계수가 $E = 88$ MPa인 것과 비교하면, 록볼트의 긴장력과 보강된 지반변형계수와의 관계는 식 (2)와 같다.

$$E' = \alpha \times E \tag{2}$$

여기서,

E' : 긴장력 있는 록볼트보강 지반변형계수(MPa)

E : 긴장력 없는 록볼트보강 지반변형계수(MPa)

α : 록볼트 긴장력에 따른 상수 ($= 0.5 \cdot \exp^{102 \cdot P}$)

P : 록볼트 긴장력(MN)

4.3 록볼트 설치간격에 따른 보강효과

록볼트를 0.4, 0.6, 0.8 m 간격으로 설치한 후 굴착지반을 제거하면서 발생한 침하량은 그림 9(a)와 같다. 록볼트의 간격이 넓어짐에 따라 침하량은 증가하고, 록볼트 긴장력이 작은 경우에서 록볼트 간격이 넓어짐에 따른 침하량 증가정도가 크게 나타났다.

그림 9(b)에서는 록볼트 설치간격과 지반변형계수와 의 관계를 도시하였다. 지반변형계수는 록볼트 설치간격과 $E' = -86s + 160$ 의 상관관계가 나타났다. 긴장력이 없는 록볼트보강 지반변형계수가 $E = 88 \text{ MPa}$ 인 것과 비교하면, 록볼트의 설치간격과 보강된 지반변형계수와의 관계는 식 (3)과 같다.

$$E' = -s \cdot E + \beta \tag{3}$$

여기서,

E' : 긴장력 있는 록볼트보강 지반변형계수(MPa)

E : 긴장력 없는 록볼트보강 지반변형계수(MPa)

β : 지반에 따른 상수

s : 록볼트 설치간격(m)

4.4 수치해석을 통한 검토

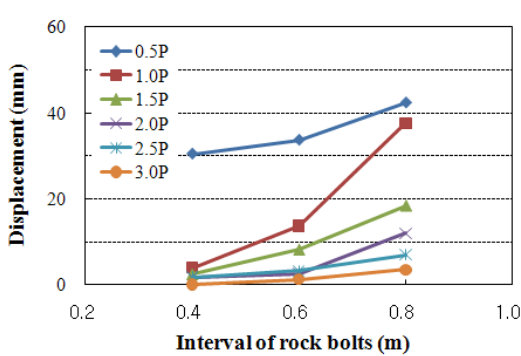
수치해석은 록볼트 보강보의 침하변형을 기본변수로 하여 합성보로서의 영향을 검토하는 것으로 유한요소해

석 FEM방법을 선정하였다. 경계요소법은 불연속면의 경계면에서 발생하는 변위와 응력을 계산하여 절리거동 영향을 판단하는 것으로 본 연구목적인 합성보로서의 영향검토는 FEM이 더 적절한 것으로 판단하였다.

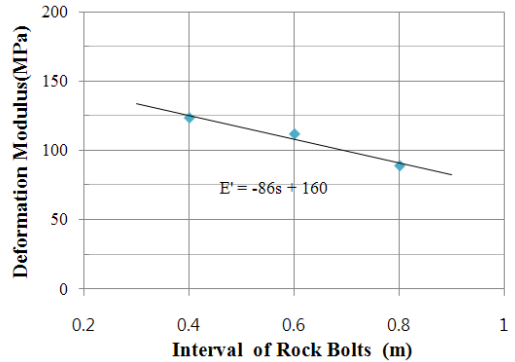
록볼트가 0.8 m 간격으로 6개 설치되었을 때 록볼트 주변으로 응력이 증가되며, 록볼트 길이에 비해 간격이 넓어 응력중첩구간이 발생하지 않으며 개별적으로 작용하는 것을 볼 수 있다. 록볼트를 0.6 m 간격으로 더 촘촘히 배치하였을 경우 응력중첩구간이 중첩되어 지지빔의 높이(또는 록볼트의 길이) H 의 $0.4H$ 정도의 압력대가 형성되었다. 록볼트 간격을 0.4 m로 보다 더 촘촘히 설치하면 응력중첩구간의 중첩부가 더 넓어져 지지빔의 높이 H 기준으로 $0.7H$ 크기의 압력대가 형성되었다.

이것은 굴착후 원지반 지지빔에 록볼트로 보강할 경우 Talobre (1957)와 김상환 등(2005)이 언급한 바와 같이 록볼트의 작용에 의해 원지반 중에 추가의 응력이 발생하며, 록볼트 길이만큼 접선 및 반경방향의 추가응력에 의해 압력대가 형성되기 때문이다.

록볼트와 지반이 합성보로 거동한다는 가정으로 모형 실험과 동일한 규모의 지반을 조성하고 지반변형계수를 변화시키면서 침하량을 분석하였다. 여기에서는 록볼트에 의한 지반보강효과를 접착력 및 내부마찰각의 변화에 대해서는 무시하고 지반변형계수의 증가로만

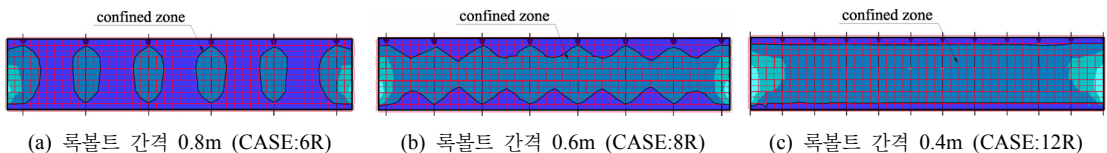


(a) 록볼트 간격에 따른 침하량



(b) 록볼트 간격과 지반변형계수와의 상관관계

그림 9. 록볼트 간격에 따른 보강효과



(a) 록볼트 간격 0.8m (CASE:6R)

(b) 록볼트 간격 0.6m (CASE:8R)

(c) 록볼트 간격 0.4m (CASE:12R)

그림 10. 록볼트 간격에 따른 압력대 형성

분석하였다. 합성보의 지반변형계수와 침하량의 관계를 확인하고, 모형실험결과와 비교분석하여 록볼트의 보강효과를 확인하였다. 합성보 중앙에서의 최대침하량과 수치해석의 입력치인 합성보 변형계수와와의 관계는 그림 11에서와 같이 반비례하는 것으로 나타났으며, 그 관계식은 식 (4)와 같다.

$$s = 5000 / E' \tag{4}$$

여기서,

s : 합성보 중앙에서의 최대침하량(mm)

E' : 합성보의 변형계수(MN/m²)

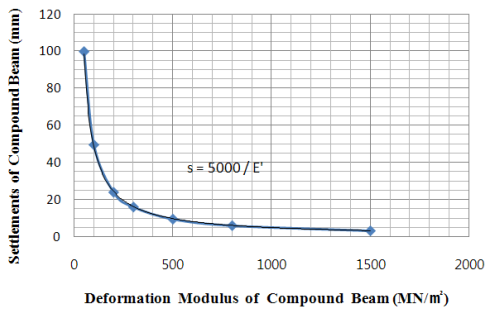
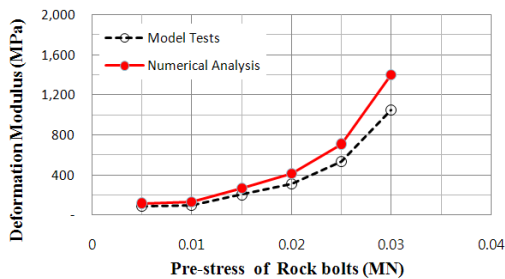
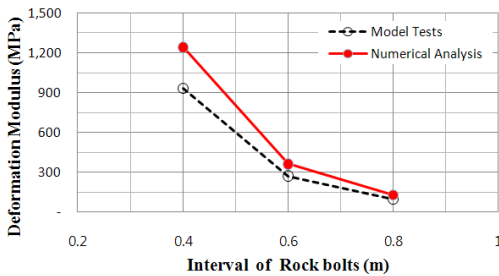


그림 11. 합성보의 변형계수와 침하량의 관계



(a) 록볼트 긴장력과 지반변형계수



(b) 록볼트 간격과 지반변형계수

그림 12. 침하량에 의한 변형계수 산정방법 비교

그림 12는 수치해석에 의한 유도식을 이용하여 모형 실험으로부터 측정된 최대침하량에 해당하는 지반변형계수 산정결과와 단순보 처짐공식에 의해 지반변형계수를 산정한 결과를 비교한 것이다.

단순보 처짐공식에서 $\delta = \frac{5qL^4}{384EI}$ 에서 상재하중 q, 보의길이 L, 지지빔의 단면2차모멘트 I는 쉽게 산정되는 값으로 계산하면 $\frac{5qL^4}{384I}$ 는 상수가 되며, 그 값은 3,761 이다. 이는 수치해석에 의해 유도된 식에서 상수 5,000 과 75%의 유사성을 보인다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 록볼트의 보강효과와 긴장력의 효과를 확인하기 위한 것으로서 모형실험을 실시하여 록볼트의 긴장력과 설치간격에 따른 침하량 변화를 관찰하였다. 그 결과 록볼트 보강에 의한 지지빔의 보강효과에 대해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 록볼트 긴장력에 의하여 마름모꼴의 보강영역이 발생하며, 록볼트 간격이 좁을수록 보강영역의 중첩이 발생하여 보강효과가 증대된다.
2. 록볼트 긴장력이 증가할수록 침하량은 감소하며, 록볼트 긴장력과 침하량의 상관관계는 로그함수 형태를 나타낸다.
3. 록볼트의 설치간격이 증가할수록 지반보강효과가 감소하여 침하량은 늘어나며, 록볼트의 설치간격과 침하량의 상관관계는 선형을 나타낸다.
4. 실험시 측정된 침하량을 이용하여 산정한 록볼트 보강에 따른 지지빔의 지반변형계수와 록볼트의 간격 및 긴장력과의 상관관계는 다음과 같이 록볼트의 긴장력 및 록볼트 설치간격에 따른 함수로 나타낼 수 있다.

$$E' = f\{\alpha, s\} \cdot E + \beta$$

여기서,

E' : 록볼트 보강지반 변형계수(MPa)

E : 원지반 변형계수(MPa)

α : 록볼트 긴장력에 따른 상수(=0.5·exp^{102·P})

β : 지반에 따른 상수

P : 록볼트 긴장력(MN)

s : 록볼트 설치간격(m)

참고문헌

1. 김상환, 방규민, 2005, 록볼트로 보강된 터널주변 지반의 강도정수 변화에 대한 연구, *한국터널공학회 학술논문집 터널기술*, Vol. 7, No.1, pp.51-61.
2. 김성수, 이병철, 김종진, 지동환, 2003, 터널 1차 지보재 내구성 확보방안, *한국터널공학회 학술논문집 터널기술*, Vol. 5 No.2, pp.52-61.
3. 정해성, 문현구, 1999, 전면접착형 록볼트의 보강효과에 관한 연구, *한국암반공학회, 터널과 지하공간*, Vol. 9, pp. 194-203.
4. Kovari, 1994, Erroneous Concepts behind the New Austrian Tunnelling Method, *Tunnels and Tunneling*.
5. Oreste, P. P. and Peila D., 1996, Radial passive rock bolting in tunnelling design with a new convergence-confinement model, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.33, No.5, pp.443-454.
6. Rabcewicz, L. v. 1964, The New Austrian Tunnelling Method, Part I, Part II, Water Power
7. Talobre, 1957, *La Mécanique des Roches*, Dunod, Paris.

안정환



1986년 충남대학교 지질학과 학사
2007년 한양대학교 토목공학과 공학석사
2009년 아주대학교 토목공학과 박사과정

Tel: 031-380-8240
E-mail: jwan@dongho.co.kr
현재 (주)동호 지반공학부 상무

이상덕



1980년 서울대학교 토목공학과 공학사
1982년 서울대학교 토목공학과 공학석사
1987년 독일 Stuttgart대학교 공학박사

Tel: 031-219-2503
E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr
현재 아주대학교 환경건설교통공학부 교수