

수치해석을 이용한 단공 케이블볼트의 적용성 연구

하태욱, 신영완 ((주)하경엔지니어링)

김태형 ((주)가포드)

1. 서론

터널 굴착은 주변 암반의 응력 재배치와 함께 변형을 발생시킨다. 터널 굴착으로 인한 암반의 이완과 변형을 최소화하기 위하여 암반 내에 강봉 또는 강선을 삽입하는 보강방법이 오래 전부터 사용되어 왔다. 록볼트와 케이블볼트로 대변되는 볼트형 지보재는 암반 내 불연속면에 의해 생성된 블록의 붕락 또는 활동을 방지하거나, 아치 형성 효과를 통한 암반 강도를 증진효과 등의 보강 특성을 갖는다. 케이블볼트는 암반 자체의 강도가 충분히 발휘되면서도 불연속면의 활동으로 인해 안정성이 저해되는 경우 효과적으로 적용될 수 있다. 또한, 록볼트에 비해 취급이 용이해 시공성이 우수하고, 상대적으로 가격이 저렴하여 경제성 역시 우수한 것으로 알려져 있다(Hutchinson and Diederichs, 1996). 이러한 장점으로 인해 국외에서는 케이블볼트의 다양한 형태와 성능을 개선하며 대단면 터널 및 광산 등 기존의 적용분야 뿐만 아니라 도로 및 철도터널 등으로 그 적용성을 넓히고 있다. 국내에서도 실내시험을 통한 케이블볼트의 역학적 특성 평가 또는 현장시험시공을 통한 적용성 검증 등 현장 적용을 위한 연구 및 노력이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 지형 및 지층조건을 달리하며, 대단면 터널 및 광산이 아닌 도로 및 철도터널 등 일반 터널을 대상으로 케이블볼트의 적용성을 검토하였다. 검토 방법은 실제 터널 설계 단계에서 수행되고 있는 2차원 연속체 수치해석을 적용하였다. 수치해석적 방법을 통하여 케이블볼트와 록볼트의 거동을 상호비교하고 분석함으로써, 단공 케이블볼트의 보강성능을 평가하였다.

2. 록볼트와 케이블볼트 수치해석

2.1 해석 조건 및 수치 모델

본 연구에서 고려한 암반조건은 강도가 양호하며 상대적으로 불연속적인 거동이 지배적인 III 등급 암반과, 암반조건이 불량하며 파쇄가 심한 V 등급 암반을 대상으로 선정하였다. V 등급 암반은 계곡부 또는 갱구부 등을 고려하여 터널 상부 토피고 30m인 일반 조건과, 편토압 조건, 그리고 상부 토피고 20m인 저토피 조건으로 세분하여 선정하였다. 본 연구에서 고려한 암반등급 및 지형 조건은 그림 2.1과 같다.

대상 터널은 한국도로공사 표준지보패턴(2003)에 준하는 2차로 터널 단면을 선정하였고, 슛크리트가 발휘하는 부재력을 작게 하여 굴착 상당력 대부분이 볼트 지보재에 작용할 수 있도록 슛크리트 두께를 70mm(III등급), 140mm(V 등급)로 감소 적용하였다.

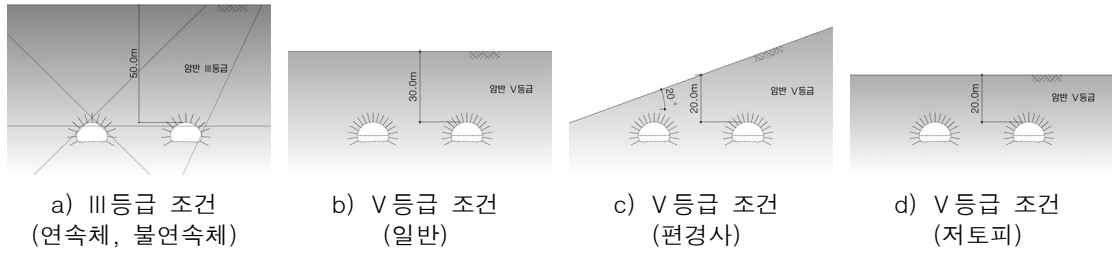


그림 2.1 해석에 고려된 암반등급 및 지형 조건

2.2 케이블볼트와 록볼트의 입력특성치

록볼트 및 케이블볼트는 일반적으로 인장력에 의해 보강이 이루어지는 보강재로 간주된다. 수치해석에 고려되는 수치 모델에서도 축방향 변위의 1개 자유도로 한정되어 축력만을 발현하는 탄성선형요소인 봉요소로 모델링된다. 록볼트 및 케이블볼트 역시 인장력이 주 보강력이긴 하나, 그림 2.2의 a)와 같이 블록의 거동에 따라 저항하는 볼트의 부재력은 상이하며, 특히 휨과 전단에 대한 고려가 필요하다(Windsor and Thompson, 1993)

따라서, 본 연구에서는 그림 2.2의 b), c)와 같이 축방향 거동만 발현되는 cable element와 함께 휨 및 전단에 대한 거동이 함께 고려되는 rockbolt element를 사용하여, 케이블볼트와 록볼트에 대한 보강 성능을 비교 분석하였다(Itasca, 2005).

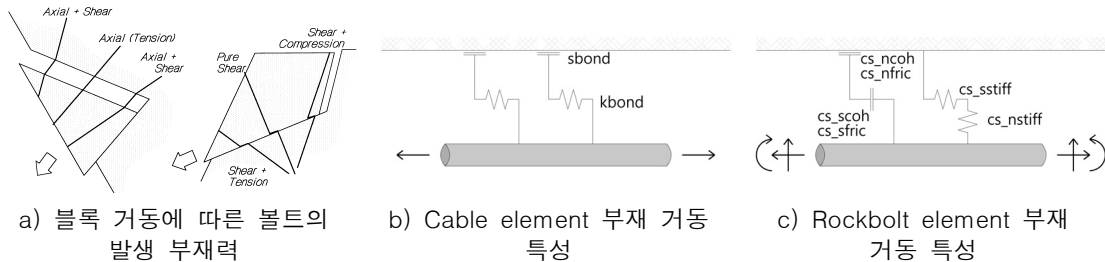


그림 2.2 볼트 발생 하중과 부재 요소에 대한 자유도 특성

록볼트와 케이블볼트에 대한 입력특성치는 별브형 케이블볼트와 록볼트의 인발시험을 수행한 (사)한국터널지하공간학회(2009)의 연구결과를 이용하여 일반 록볼트의 강성 및 강도 대비 케이블볼트의 강성 및 강도 비율의 평균을 산정 후 전단강성 및 점착강도의 입력치를 결정하였다.

3. 해석 결과 분석

표 3.1은 암반등급 및 지형 조건별 천단침하, 내공변위, 슛크리트 휨응력 등 해석 결과를 정리한 것이다. 해석 결과에서 알 수 있는 바와 같이 암반등급별 또는 지형 조건별 천단침하와 내공변위는 볼트 종류와 수치모델 종류에 따라 미소한 차이가 발생한다. 슛크리트에 발생하는 휨응력의 경우 III등급 암반조건에서 록볼트에 비해 케이블볼트를 적용한 경우에서 미소한 차로 크게 발생

하나, V 등급 암반조건에서는 록볼트가 크게 발생하였다. 볼트에 발생하는 축력은 록볼트가 케이블볼트에 비해 상당히 큰 값이 발생하나 이는 볼트 재료의 탄성계수와 단면적 차에 의한 것으로, 록볼트($A=506.7\text{mm}^2$)와 케이블볼트($A=138.7\text{mm}^2$)의 단면적을 고려한 부재응력 차는 매우 미소하다.

표 3.1 각 검토 조건별 수치해석 결과

구분		천단침하 (mm)	내공변위 (mm)	S/C휨응력 (MPa)	볼트 축력 (kN)	
III 등급	케이블볼트	cable ele.	2.334	2.320	2.817	3.297
		rockbolt ele.	2.334	2.320	2.816	3.297
	록볼트	cable ele.	2.333	2.319	2.814	12.213
		rockbolt ele.	2.333	2.319	2.813	12.213
V 등급 (일반 조건)	케이블볼트	cable ele.	15.700	15.420	8.926	24.510
		rockbolt ele.	15.700	15.430	8.926	24.465
	록볼트	cable ele.	15.570	15.320	9.013	84.825
		rockbolt ele.	15.600	15.330	9.011	84.780
V 등급 (편토압 조건)	케이블볼트	cable ele.	15.290	9.181	7.778	24.960
		rockbolt ele.	15.300	9.166	7.780	24.360
	록볼트	cable ele.	15.190	9.083	7.839	82.620
		rockbolt ele.	15.200	9.112	7.836	86.580
V 등급 (저토펜 조건)	케이블볼트	cable ele.	10.270	10.730	5.927	15.855
		rockbolt ele.	10.270	10.730	5.928	15.855
	록볼트	cable ele.	10.190	10.620	5.958	54.465
		rockbolt ele.	10.200	10.620	5.957	54.450

표 3.2는 각 지보요소에 발생한 변위를 통해 추정된 각 해석조건별 숏크리트 및 록볼트, 케이블볼트의 변형정도를 나타낸 것이다. 암반 강도가 양호한 III등급 암반의 경우 케이블볼트나 록볼트의 거동 경향은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 강도가 약한 V 등급은 터널 굴착으로 인한 볼트의 변형이 크게 발생하였다. 특히 편토압 지형과 저토펜 조건에서는 록볼트에 비해 휨강성이 약한 케이블볼트의 변형이 크게 발생하여, 불량한 암반의 강도를 증진시키는 볼트 지보 성능에서는 상대적으로 효과가 낮을 것으로 평가된다.

표 3.2 암반등급 및 지형 조건별 터널 변형도(연속체 해석 결과)

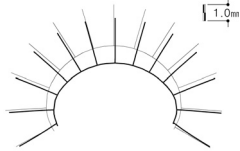
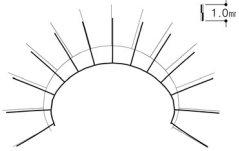
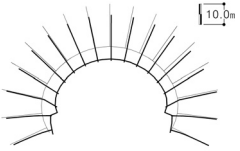
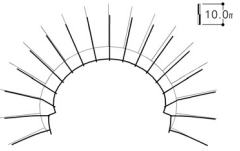
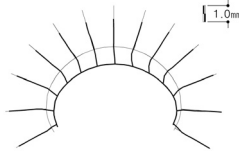
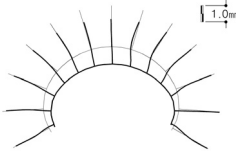
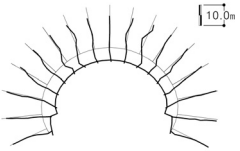
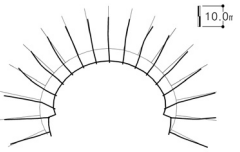
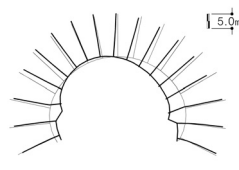
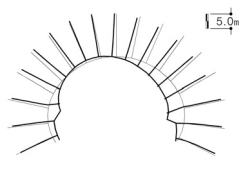
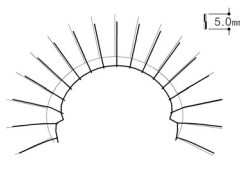
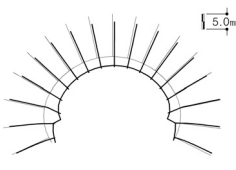
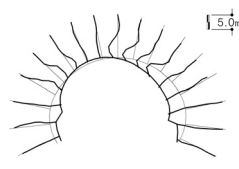
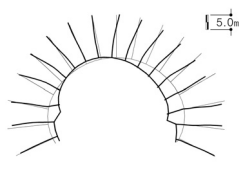
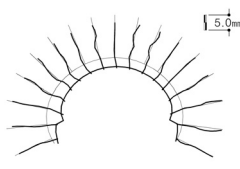
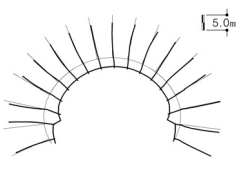
구분	III 등급		V 등급(일반 지형 조건)	
	케이블볼트	록볼트	케이블볼트	록볼트
Cable Element				
Rockbolt Element				

표 3.2 암반등급 및 지형 조건별 터널 변형도(연속체 해석 결과, 계속)

구분	V 등급(일반 지형 조건)		V 등급(일반 지형 조건)	
	케이블볼트	록볼트	케이블볼트	록볼트
Cable Element				
Rockbolt Element				

4. 결론 및 고찰

수치해석적 방법을 통해 일반 터널에서 사용되는 길이의 케이블볼트와 록볼트의 보강 성능을 평가한 결과, 터널 변형 및 슛크리트에 발생한 부재력은 암반등급과 지층 조건에 관계없이 미소한 차이를 보였다. 그러나, V 등급 암반에서 발생한 케이블볼트의 변형은 록볼트에 비해 변형정도가 크게 발생하였으며, 특히 휨 및 전단에 대한 자유도를 갖는 부재 요소를 사용하는 경우 그 정도가 더욱 크게 나타났다. 이를 통해 케이블볼트는 강도가 양호한 암반에서의 활동성 블록을 매달아 암반을 지지하는 효과를 나타내는데 보다 타당하며, 록볼트는 불량한 암반조건에서 큰 휨강성으로 빔형성 및 아치 형성 효과를 발현하여 암반 강도를 증진하는 효과를 나타내는데 타당한 것으로 판단된다.

따라서, 일반적인 교통터널 등에서 짧은 길이의 볼트를 사용하는 경우, 암반조건이 양호하며 불연속면에 의한 암블록의 거동이 지배적인 I ~ III 등급 암반에서는 케이블볼트와 록볼트의 보강 성능은 큰 차이가 없으나, 암반조건이 불량하고 변형성이 큰 V 등급 암반에서는 케이블볼트에 비해 휨강성이 큰 록볼트의 보강효과가 상대적으로 우수한 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

1. Hutchinson, D.J. and M.S. Diederichs, 1996, Cablebolting in Underground Mines, BiTech Publishers Ltd.
2. Windsor, C.R and A.G. Thompson, 1993, Rock reinforcement - technology, testing, design and evaluation, Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects, (ed. Hudson), Oxford, Pergamon Press, 4, pp. 451-484.
3. (사)한국터널지하공간학회, 2009, 벌브형 케이블볼트의 성능 평가 및 적용성 검토 연구보고서
4. ITASCA Consulting Group, Inc. (2005). FLAC Manual, Version 5.0
5. (사)한국터널지하공간학회 (2009), 벌브형 케이블볼트의 성능 평가 및 적용성 검토 연구보고서