

터널의 안전을 평가를 위한 지보재 모델링 방법 비교 연구

한동식 ((주)도담E&C)
유광호, 박연준 (수원대학교)

1. 서 론

지하구조물의 거동과 안정성을 정량적으로 평가하기 위해서는 지반뿐만 아니라 지보재에 대해서도 신뢰성 높은 해석법이 필요하다.

터널의 파괴는 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 한계평형법에 기초한 해석법을 적용하여 안전율을 구하는 데에는 한계가 있으며 현재의 설계방법도 정량적인 기준이 없다. 따라서, 터널의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 전단강도 감소기법을 이용한 터널의 안전율을 산정함에 있어 지반의 파괴뿐만 아니라 지보재의 파괴도 터널의 안정성에 큰 영향을 미치므로 터널의 내공변위를 억제하고 소성영역의 발생을 방지하는 지보재의 파괴도 고려되어야 한다.

특히 굴착 후 즉시 타설되는 1차 지보재인 슛크리트의 정확한 설계를 위해서는 지반과 슛크리트의 상호거동이 고려되어야 한다. 이러한 지보재의 파괴가 고려된 터널의 안전율을 산정하는 방법으로 슛크리트 내에 발생하는 응력이 허용응력을 초과하면 슛크리트가 파괴된다고 가정하고 전단강도 감소기법을 이용하여 지반과 슛크리트의 파괴를 고려한 안전율을 구하는 방법이 유광호 등(2000; 2001; 2005)에 의해 제시되었다.

본 논문에서는 Dawson et al.(1999)에 의해 제안된 기법인 전단강도 감소기법을 사용하여 보요소와 연속체요소의 거동을 상세히 파악하여 안전율을 산정하고, 적정 지보재의 모델링 방법을 제시하고자 한다.

2. 지보재 모델링 방법

2.1 지반 및 지보재 모델링

그림 1은 2차원 터널 해석을 위한 해석영역과 해석요소망을 보여주고 있다. 폭 5m, 높이 8m의 터널이며 균질한 암반에 굴착되는 것으로 가정하여 터널 굴착 시 미칠 수 있는 영향을 고려하여 높이 90m, 폭 45m의 해석영역을 선정하였고, 모델의 외부경계는 터널 반경의 9배로 설정하였다. Radial mesh로 터널경계에서 외부로 갈수록 요소의 크기를 늘려 해석을 수행하였고, 전체요소의

좌우 측면경계는 수평방향 변위를 구속하고 하부경계는 수직방향을 구속하여 경계조건을 설정하였다.

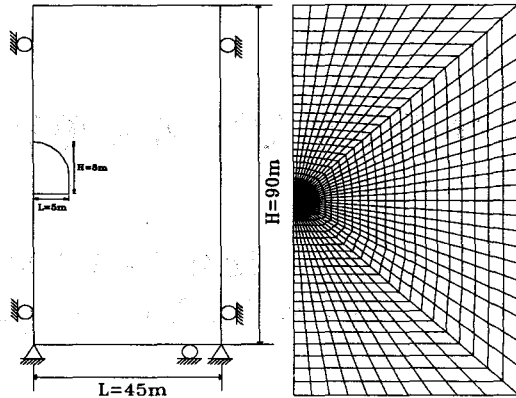


그림 1. 해석영역 및 해석 요소망

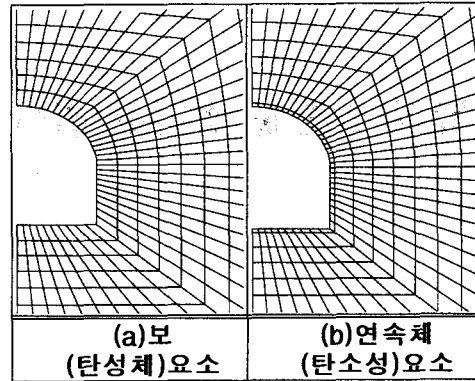


그림 2. 수치해석 지보재 모델링 방법

지보재는 모델링 방법에 따라 해석결과의 차이점을 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 1과 같은 해석 요소망에 적정 지보재의 모델링 방법을 선정하기 위하여 그림 2와 같은 보요소(a)와 연속체요소(b)를 사용하여 모델링을 수행하였다. 지보재의 모델링 방법에 따른 안전율을 산정하여 지보재 모델링 방법을 비교하고자 하였다.

지보재를 모델링하는 방법 중 보요소로 가정할 경우 강도감소기법에 있어서 슛크리트는 해석결과가 수렴하게 되더라도 파괴가 되는 지보재가 있는지를 판단하기 위하여 허용응력설계법 개념을 적용하여 지보재의 파괴를 판단하고, 이를 근거로 터널의 안정성을 판단하였다(유광호 등, 2000). 허용응력 설계법 개념은 지보재의 압축강도와 인장강도를 허용압축강도와 허용인장강도와 각각 비교하여 허용강도 이상의 응력이 발생하면 지보재가 파괴되는 것으로 가정하는 방법이다. 한편 연속체(탄소성)요소로 모델링 할 경우는 부재력을 따로 계산해야하는 불편함이 있지만 지반과 같이 거동한다는 이점으로 안전율 계산 시 별도로 지보재의 파괴를 판단하지 않아도 되는 장점이 있다.

또한, 보요소와 연속체요소의 지보재 모델링 방법에 따른 거동특성을 상세히 파악하고자 그림 3의 (a), (b)와 같이 지보재인 슛크리트 모델링 층의 개수를 1, 5, 10개의 층으로 나누어 비교하였다.

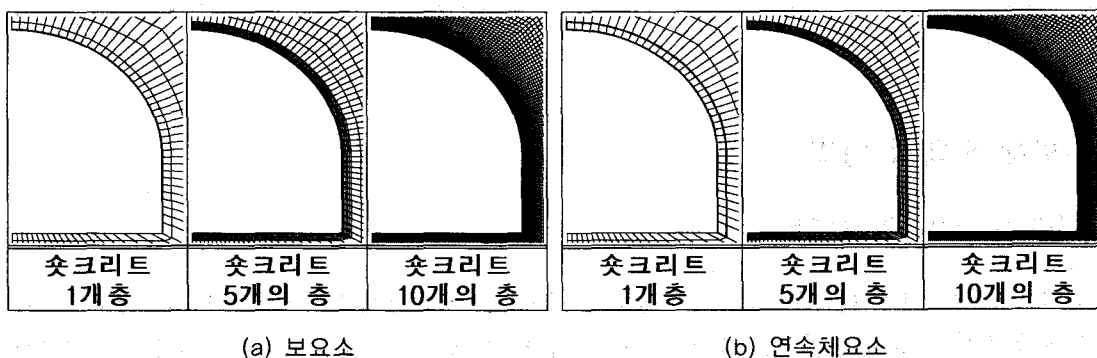


그림 3. 수치해석 지보재 모델링 방법

2차원 해석은 표 1과 같은 방법으로 암반등급을 1등급으로 한정하여 슛크리트 모델링 층의 개수를 1, 5, 10층으로 세분화하고, 축압계수가 0.5, 1.0, 2.0일 때, 전단면 굴착과 상하분할 굴착에 대하여 슛크리트 두께를 12cm, 20cm, 30cm로 나누어 해석을 수행하였다.

표 1. 등급별 지보방법

구 분			1등급		
K ₀ = 0.5 1.0 2.0	스�크리트 층수		1, 5 10 layers		
	굴착방법		전단면	상하분할	
	지보 방법	무지보		○	
		스�크리트(cm)		12/20/30	
		락 볼 트	길이(m)	4	
			중/횡 간격(m)	1/1	

2.2 수치해석을 위한 입력 물성치

해석에 사용된 지반의 물성치는 한국도로공사에서 제시한 암반등급별 변형계수 및 강도정수를 사용하였다(한국도로공사 도로교통기술원, 2002). 이 물성치는 기존의 설계자료와 Bieniawski가 RMR 값을 바탕으로 제안한 물성치를 참조하여 암반등급별 물성치를 가정한 것으로 그 중 1등급에 대하여 표 2에 정리하였다.

표 2. 해석에 사용된 암반등급별 변형계수 및 강도 정수 (한국도로공사 도로교통기술원, 2002)

물성 및 암반등급	탄성계수 (GPa)	체적 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	마찰각 (deg)	점착력 (Pa)	밀도 (kg/m ³)	인장강도 (Pa)
1등급	34.12	22.75	13.65	45	1e6	2600	5e5

해석에는 지보재로서 강섬유보강 슛크리트(Steel fiber reinforced shotcrete, SFRS)가 사용되었다. SFRS는 일반 슛크리트에 비하여 설계기준강도 f_{ck} 가 약 10% 증가한다고 알려져 있으며, 파괴 후에도 지지력을 상실하지 않아 에너지 흡수량이 수백% 증가한다고 알려져 있다(한국도로공사 도로연구소, 2001). 이러한 사항을 고려하여 SFRS의 허용응력은 일반 슛크리트의 허용응력을 50% 정도를 증가시킨 값을 사용하였다. 즉, 설계기준강도가 f_{ck} 인 경우 SFRS의 압축 및 인장 허용응력은 계산하면 식(1)과 같이 계산된다.

$$\sigma_{ca} = 0.6 f_{ck} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

$$\sigma_{ta} = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

숏크리트를 연속체(탄소성)요소로 가정한 강섬유보강 숏크리트(SFRS)의 점착력 및 내부 마찰각의 값은 실험결과 및 기존 연구결과의 내용이 충분치 않으므로 본 연구에서는 일축압축강도 및 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 적용하여 추정된 가정치를 사용하였다. 숏크리트의 일축압축강도 σ_c 는 235kg/cm²로 가정하였으며, 내부마찰각 ϕ 는 35°로 가정하였다. Mohr-Coulomb의 파괴기준으로부터 유도한 식(2)를 사용하여 점착력을 구하였다. 보(beam)요소로 모델링할 경우와 연속체(탄소성)요소로 가정할 경우의 숏크리트의 입력 파라미터들을 표 3에 정리하였다.

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2)$$

표 3. 숏크리트 입력 파라미터

보요소							
두께(cm)	12cm		20cm		30cm		
면적(m ²)	0.12		0.2		0.3		
탄성 계수 (GPa)	soft	5					
	hard	15					
단면2차 모멘트(m ⁴)	1.44e-4		6.66e-4		2.25e-3		
연속체요소							
구 분	탄성 계수 (GPa)	체적 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	마찰각 (deg)	점착력 (MPa)	밀도 (kg/m ³)	인장강도 (MPa)
soft	5	2.78	2.08	35	6	2300	3
hard	15	8.33	6.25	35	6	2300	3

3. 수치해석 결과

3.1 지보재의 해석조건에 따른 암반등급별 안전율

지보재의 거동을 상세히 파악하기 위해 숏크리트 모델링 층의 개수를 1, 5, 10개 층으로 달리 하여 축압계수, 숏크리트 두께 및 굴착방법별로 암반등급에 따라 안전율을 구하여 비교하였으며, 주지보재인 숏크리트는 보요소와 연속체요소로 모델링하여 비교하였다.

보요소로 모델링하여 해석한 경우는 전단강도 감소기법에 의해 구한 안전율에서 지반과 지보재의 파괴를 고려하기 위해 지보재의 휨 응력을 구하여 지보재의 파괴를 고려하였다. 다만, 해석에 사용된 숏크리트는 강섬유보강 숏크리트로서 숏크리트의 허용압축응력 f_{ca} 는 126 kg/cm², 허용인장응력 f_{ta} 는 9.1 kg/cm²을 적용하여, 허용응력을 초과할 경우에는 숏크리트가 파괴된 것으로 판별하였다. 연속체(탄소성)요소로 모델링하여 해석한 경우는 지보재인 숏크리트를 탄소성체로 가

정하였기 때문에 지반과 같이 파괴가 고려되었다.

그림 4에 정리된 2차원해석 결과 지보재인 슛크리트 모델링 층의 개수가 1, 5, 10개 층으로 증가할수록 안전율이 보다 낮게 나타나는 경향을 나타냈다. 암반등급이 높을수록 슛크리트를 보요소와 연속체요소로 모델링한 경우 모두 안전율은 높게 나타났다. 슛크리트의 모델링 방법에 따른 안전율은 비슷한 변화양상을 보였으나 연속체 요소로 모델링한 경우가 보요소로 모델링한 경우보다 전반적으로 안전율이 높게 산정되었다.

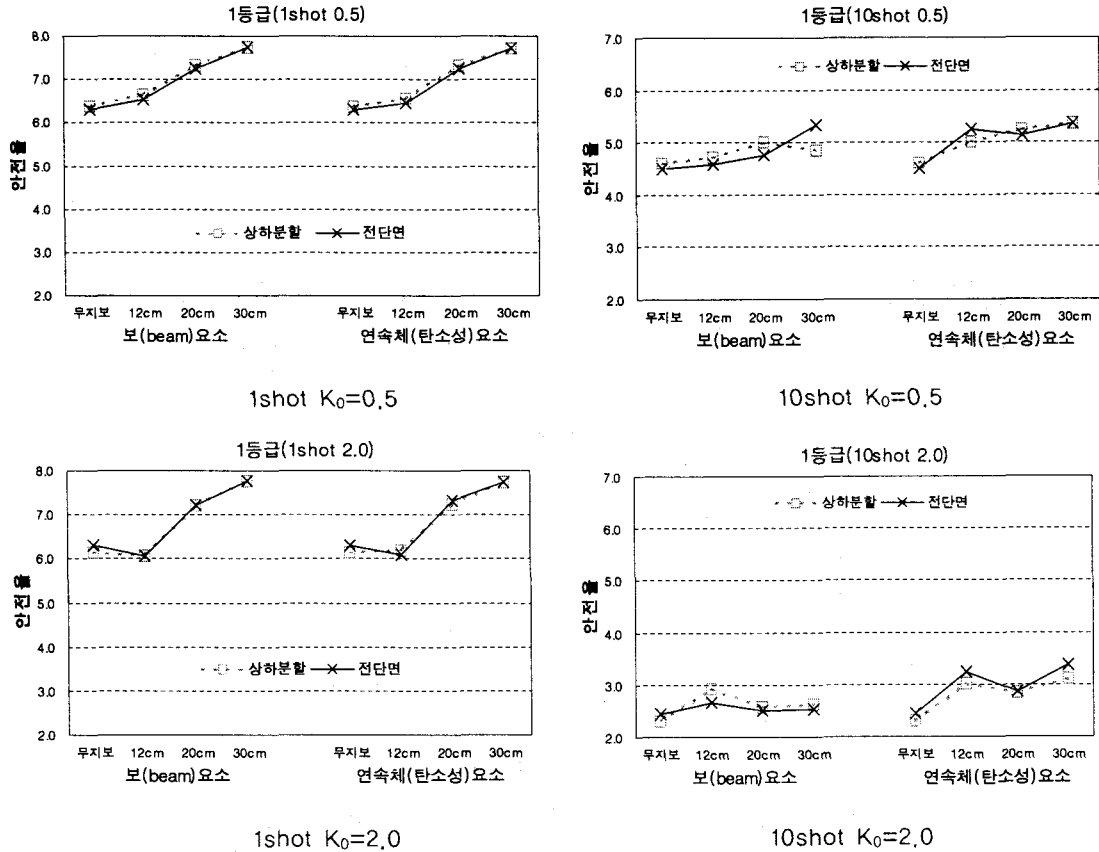


그림 4. 암반의 슛크리트 두께 및 굴착방법에 따른 안전율

그림 4와 같이 대상 암반상태가 양호하여 상하분할 굴착과 전단면 굴착에서 같은 슛크리트 모델링 층에서의 안전율 변화 양상은 유사하였다. 슛크리트 모델링 층의 개수가 증가할수록 안전율은 낮아지는 경향을 나타내고, 슛크리트 모델링 층의 개수가 10개인 경우가 1개 층에서의 안전율보다 슛크리트 두께 증가에 따른 안전율 증가분이 크지 않았다. 1등급 암반에서 지보재의 거동은 연속체요소로 모델링한 경우가 보요소로 모델링한 경우보다 안전율이 높게 나타나거나 유사하였으며, 상하분할 굴착과 전단면 굴착의 안전율은 대체적으로 비슷하였다.

암반의 측압계수가 0.5인 경우는 굴착방법에 따른 차이는 없는 것으로 판단되며, 슛크리트 모델링 층의 변화와 상관없이 보요소와 연속체요소로 모델링한 경우에 슛크리트 두께 증가에 따른 안전율은 증가하였다.

측압계수가 2.0인 경우는 보요소와 연속체요소 모두 슛크리트 모델링 층의 개수가 1개 층일 때 슛크리트 두께를 증가 시킬 경우 급격한 안전율의 증가를 보이지만, 슛크리트 모델링 층을 10개

층으로 세분화하였을 때에는 슛크리트 두께 증가에 따른 안전율의 증가는 크지 않았다.

3.2 연속체요소의 적정요소 크기 분석

그림 5는 연속체요소의 슛크리트 모델링 층의 개수를 1, 5, 10개의 층으로 세분화하였을 때 수치해석상으로 적절한 지보재 모델링 요소 크기를 판단하고자 정리한 그래프이다.

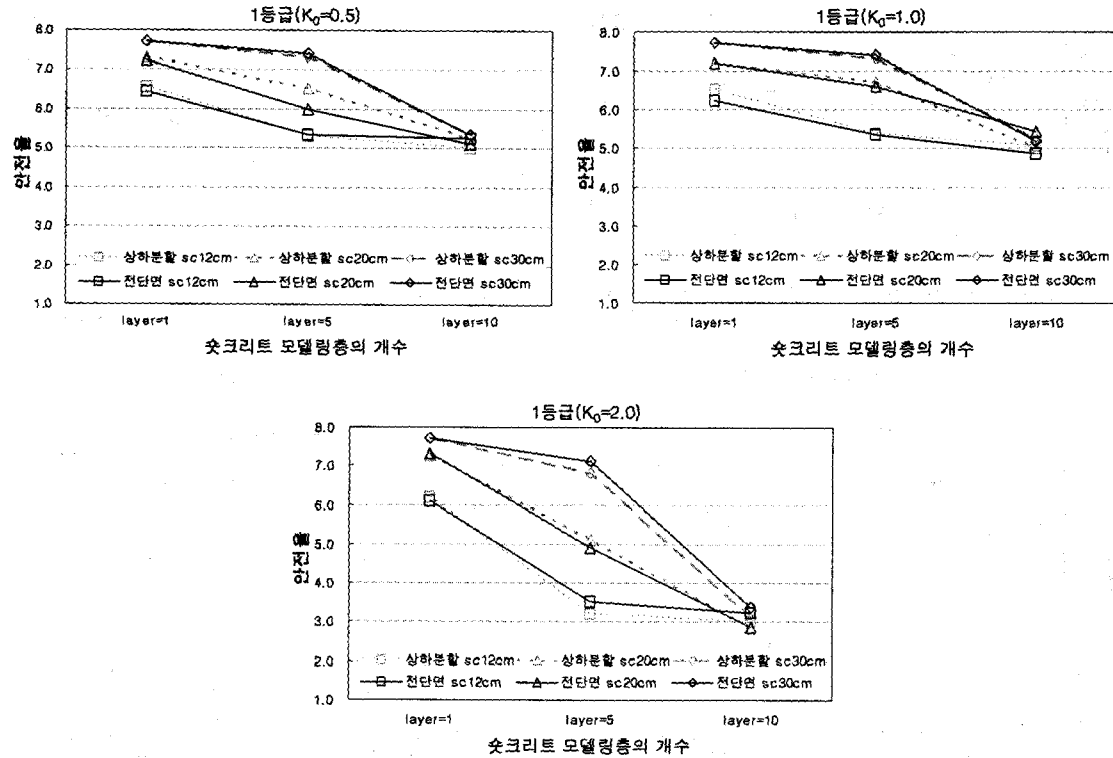


그림 5. 1등급 암반의 슛크리트 모델링 층에 따른 안전율

그림 5와 같이 축압계수가 0.5와 2.0일 때, 슛크리트 두께 12cm에서 슛크리트 모델링 층을 5개 층에서 10개 층으로 세분화하여도 안전율의 변화가 나타나지 않았다. 따라서, 요소하나의 크기가 2.4cm인 5개의 모델링 층으로도 안정한 수치해석 결과를 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 반해 슛크리트 두께 20cm, 30cm에서는 요소하나의 크기가 2cm, 3cm인 10개의 모델링 층으로 세분화하여도 안전율의 감소가 나타나 모델링 층을 더욱 세분화할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 그러나 10개 이상의 모델링 층으로 세분화한다면 해석요소의 크기가 더욱 작아져 수치해석상 계산 시간도 많이 소요되고, 불안정한 결과를 가져올 수 있기 때문에 요소하나의 크기가 2cm, 3cm인 10개의 슛크리트 모델링층만으로도 적절한 수치해석 결과를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 보요소와 연속체요소의 지보재 모델링 방법에 따른 차이점을 분석하였고, 전단 강도 감소기법을 이용하여 보요소와 연속체요소의 지보재 파괴를 고려한 터널의 안전율을 산정하

였다. 보요소로 모델링한 경우는 허용응력 설계법을 이용하여 지보재의 파괴를 고려하였다. 또한 보요소와 연속체요소의 지보재인 슛크리트 모델링 층의 개수를 1, 5, 10개 층으로 세분화하여 지보재 거동을 상세히 파악하여 안전율을 산정하였다. 지보재의 파괴를 고려한 터널의 안전율이 터널 전체의 안정성을 나타내는 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연속체요소로 모델링 한 경우가 같은 조건에서 보요소로 모델링한 경우의 안전율보다 약간 높았다. 이는 간접적으로 파괴를 고려하는 보요소가 지보재에 작용하는 작은 하중에도 응력 집중이 크게 발생하여 안전율이 낮게 산정된 것으로 판단된다.
2. 연속체요소로 모델링한 경우의 안전율이 지보재의 증가와 굴착방법에 따라 보요소로 모델링한 경우보다 안정함을 확인하였다.

안전율 계산에서 보(beam)요소로 모델링 할 경우 연속체요소로 모델링 할 경우에 비해 지보재에 과도한 응력의 집중으로 안전율이 과소평가되는 결과가 발생하였다. 그러므로 지보재의 모델링은 지반과 같이 거동할 수 있는 연속체(탄소성)요소로 모델링하거나 보요소를 사용할 경우는 허용응력 설계법보다 현실적으로 판단할 수 있는 기준을 사용하여 지보재의 파괴를 고려하는 것이 보다 안정되고 정확한 안전율을 얻을 수 있다고 판단된다.

사 사

본 연구는 건설교통부의 건설기술 핵심연구 개발사업을 위한 연구지원(과제번호: 04핵심기술 C01)에 의해 수행되었으며, 본 연구를 위해 지원해주신 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. Dawson E. M., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999) "Slope Stability Analysis by strength reduction", *Geotechnique*, Vol. 49, No. 6, pp. 835-840.
2. 유광호, 박연준, 배규진, (2000) "연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가", *대한터널협회 논문집*, Vol. 2, No. 3, pp. 47-57.
3. 유광호, 박연준, 강용, (2001) "절리암반 터널의 안전율 평가를 위한 수치 해석적 연구", *한국암반공학회*, 제11권, 제3호, pp. 279-288.
4. 한국도로공사 도로연구소, (2001) "강점유보강 슛크리트의 성능 향상 및 품질기준 정립(II)".
5. 한국도로공사 도로교통기술원(2002), "암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구".
6. 유광호, 박연준, 홍근영, 이현구, 김재권(2005), "지보재 파괴를 고려한 터널 안전율의 수치해석적 산정 연구", *한국터널공학회 터널기술* Vol. 7, No. 1, pp. 42.