

터널의 안전을 평가 기법에 관한 연구

박종원¹⁾, 박연준²⁾, 유광호²⁾

¹⁾태조엔지니어링, ²⁾수원대학교

1. 서론

사면의 경우 대표적인 파괴양상들이 있으며 파괴면의 형상을 사전에 가정할 수가 있다. 하지만 터널의 경우는 사면의 경우와는 달리 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어려워 한계평형기법에 기초한 해석법 등을 적용하여 안전율을 구하기가 곤란하다(유광호, 2000). 이러한 이유에서 터널을 대상으로 한 수치해석은 안전율을 구하기보다는 설계 검증에 위한 안전성 평가에 제한적으로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 터널의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 전단강도 감소법을 이용하여 터널의 안전율을 계산하는 수치해석기법을 정립하였다.

전단강도 감소기법은 지반이 파괴될 때까지 지반의 강도를 감소시켜가며 반복적으로 해석을 수행하여 안전율을 구하는 방법으로, 파괴 활동면을 미리 가정하지 않아도 안전율과 파괴 활동면을 동시에 구할 수 있는 장점이 있다. 터널의 주된 지보재인 숯크리트와 록볼트는 터널의 내공변위를 억제하고 소성영역의 발생을 방지하는 역할을 하는데, 지지력을 초과하는 힘을 받게 되어 파괴되면 터널의 안정성을 보장할 수 없다. 본 연구에서는 전단강도 감소기법을 사용하여 지반의 파괴 및 이에 따른 지보재의 파괴를 고려한 터널의 정량적 안정성 평가기법을 개발하고, 2차선 도로터널에 적용하여 이의 안정성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

2. 터널의 안전을 평가기법

2.1 터널의 안전율

안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 지반 구조물이 붕괴될 때의 가상 지반강도와를 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 지반의 실제강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다(Duncan,1996). 사면의 경우 전단강도 감소기법은 실제 중력을 가한 상태에서 지반의 강도를 감소 시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 강도비로서 안전율을 구한다. 이러한 원리는 보강되지 않은 사면이나 보강된 사면에 모두 적용될 수 있다.

터널이나 사면 모두 지반 구조물이며, 그 파괴가 주로 중력에 기인하므로 터널의 경우에도 동일한 개념이 적용될 수 있다. 이러한 개념의 안전율을 포괄적인 안전율(global factor

of safety)이라고 하며, 구조물 전체의 안정성을 대표하는 개념이다.

터널의 경우 터널 주변 지반에 국부적인 파괴가 발생한다 하더라도 지보재가 지지하여 주므로 터널 전체의 안정성에는 영향을 주지 않는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 앞서 설명한 포괄적인 안전율의 개념을 사용하여 안전율을 계산하기로 한다.

2.2 전단강도 감소기법

유광호, 박연준(2000)은 연약암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가에서 전단강도 감소기법을 사용하여 터널의 안전율을 구하는 기법을 제시하였다.

터널안정해석에서 전단강도 감소기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 를 시험안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다. 이때 시험 안전율(trial factor of safety)과 이에 의해 감소된 지반의 물성은 그림1에 나타낸 바와 같이 원래의 물성을 선형적으로 감소시킨 것이며 원래의 물성과 다음의 관계를 갖는다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \quad (\text{식 1})$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi\right) \quad (\text{식 2})$$

이 시험 안전율에 의해 감소된 지반의 물성을 가진 암반에 터널을 굴착하였더니 파괴가 발생하였다면, 터널의 안전율은 방금 적용되었던 시험 안전율보다는 작은 것이며, 파괴가 발생하지 않았다면 시험안전율보다는 큰 값을 나타낸다. 따라서 터널의 파괴가 발생되기 시작하는 시점의 시험안전율을 구하면, 이것이 곧 터널의 안전율이 된다고 할 수 있다.

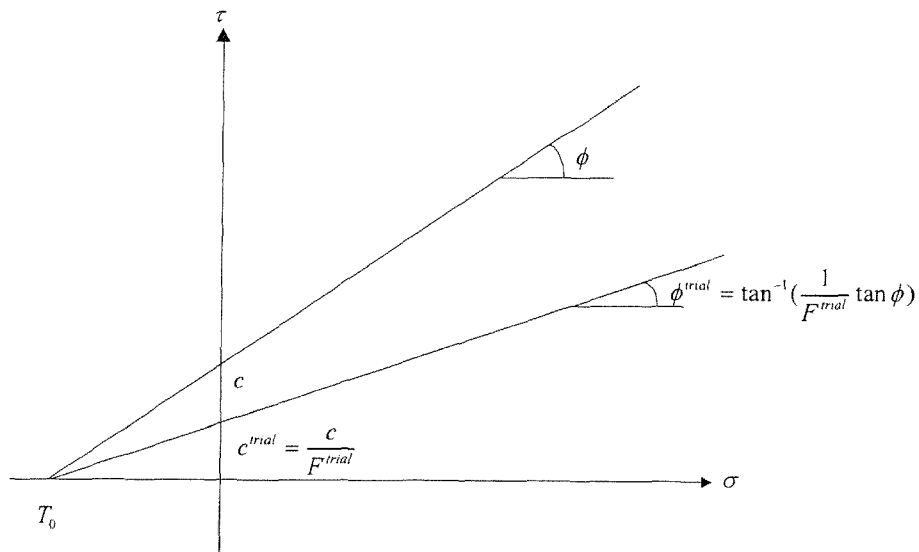


그림 1 전단강도와 시험 전단강도 (박연준, 유광호, 1998)

2.3 전단강도 감소기법에 의한 터널의 안전율 계산 Routine

터널의 파괴가 발생하는 시점의 시험 안전율을 구하기 위해서는 먼저 시작값 (F^{start}) 과 증분값 (F^{inc})을 정한다. 이때 시작 값은 해석 결과가 평형 상태, 즉 터널의 파괴가 발생하지 않는 시험 안전율이 되어야 하며, 증분값은 원하는 안전율의 정확도에 따라 정해 지는데, 해석과정에서 단계별로 감소시킬 수 있다.

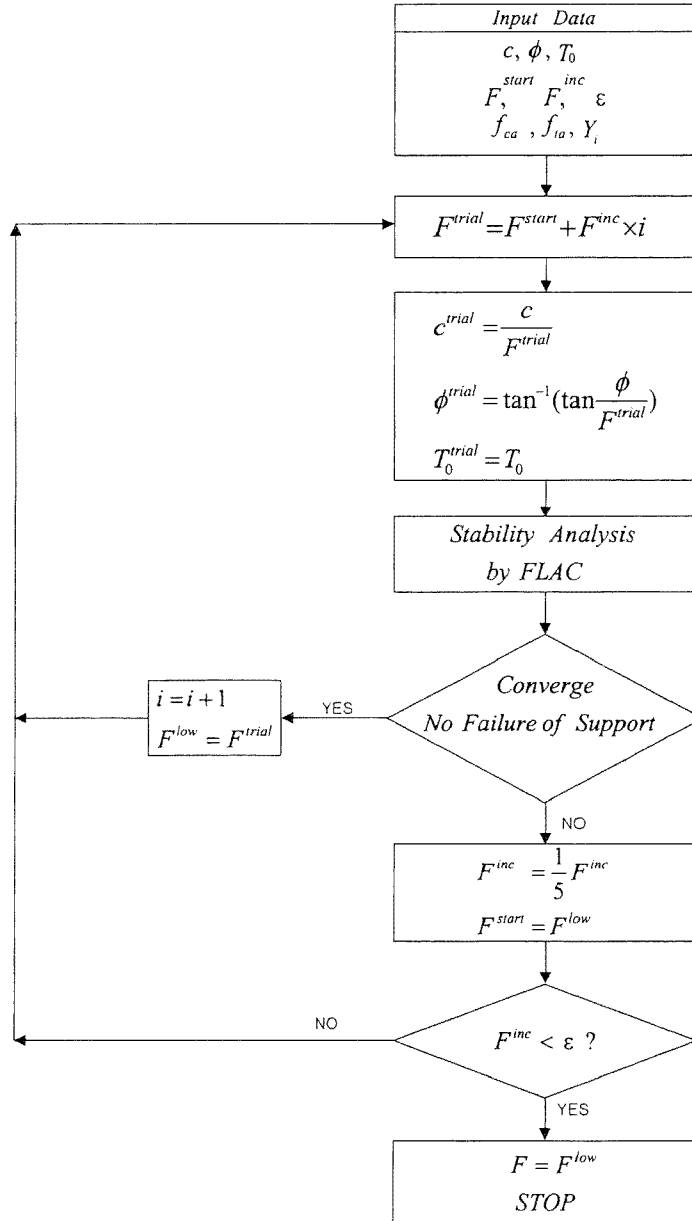


그림 2 안전율 계산 과정의 흐름도 (유광호, 박연준, 배규진, 2000)

해석결과가 수렴되고 지보재에 작용하는 응력이 허용 응력을 초과하지 않으면 터널의 파괴가 발생하지 않은 것이므로 시험안전율 (F^{trial})은 증분값 만큼 증가되고, 이 때 시험 안전율은 F^{low} 로 저장된다. 이러한 상태로 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 반복 수행한다. 어느 시점에서 해석 결과가 수렴하지 않으면, 이 시험 안전율은 실제 안전율보다 높은 값이므로 바로 전 단계의 안전율인 F^{low} 을 새로운 시작점으로 하여 다음 단계로 넘어가 감소된 증분 값을 사용하여 동일한 계산을 수행한다. 즉 초기의 안전율을 1.0으로 정하고 이 결과가 수렴하면, 시험안전율을 다시 1.0간격으로 증가 시켜가며 (즉 1.0, 2.0, 3.0, ...) 해석을 수행한다. 이때 해석에 사용되는 지반의 강도는 점차 감소하게 된다. 만일 2.0에서 해석 결과가 수렴하지 않을 경우, 실제안전율은 2.0에서 1.0 사이의 값을 가지게 되므로 1.0에서부터 0.2 간격으로 시험안전율을 증가 시켜가며 해석을 수행한다. 다시 1.2에서 해석 결과를 수렴하지 않으면, 실제 안전율은 1.0에서 1.2사이에 존재하므로 1.0에서부터 0.02간격으로 시험안전율을 증가시켜가면서 해석을 수행한다. 만일 해석 결과가 1.16에서 수렴하지 않으면 실제 안전율은 1.14에서 1.16 사이의 값이므로 1.15를 터널의 안전율로 취한다(유광호, 박연준, 배규진, 2000). 그림 2는 이러한 방법으로 안전율을 구하는 해석과정을 나타내는 흐름도이다.

3. 해석조건 및 방법

3.1 해석을 위한 지반모델

암반의 등급을 고속도로 터널 기준안으로 6등급으로 분류하여 해석을 수행하였다. 그림 3은 터널 해석을 위한 지반 모델이다. 터널 주변에 미칠 수 있는 영향을 고려하여 터널 상부 지반의 깊이를 터널 높이의 5배 이상, 좌측 경계를 터널 폭의 2배 이상으로 하였다.

요소의 폭과 높이는 1m를 기준으로 하였고, 해석의 정확성을 높이기 위하여 터널 부근의 요소는 한 변의 길이가 0.5m 내외가 되도록 더 조밀하게 하였다.

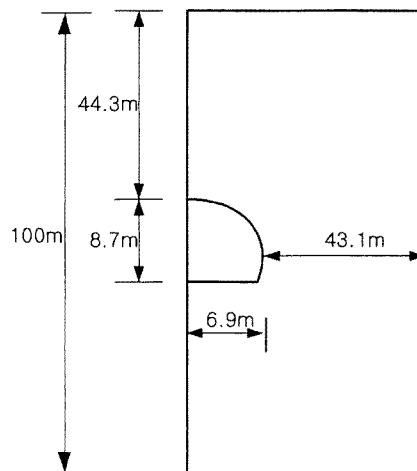


그림 3 터널 해석을 위한 지반 모델

3.2 지보재의 물성

1) 슛크리트 물성

1등급 암반을 제외한 모든 등급의 암반에는 강섬유보강 슛크리트(SFRS)를 사용하였다. SFRS는 일반 슛크리트에 비하여 설계기준강도 f_{ck} 가 약 10% 증가한다고 알려져 있으며, 파괴 후에도 지지력을 상실하지 않아 에너지 흡수량이 수백% 증가한다고 알려져 있다 (도로공사, 2001). 이러한 사항을 고려하여 SFRS의 f_{ck} 를 일반 슛크리트 재령 28일 압축 강도인 210 kg/cm^2 의 50%을 증가시킨 315 kg/cm^2 로 가정하였다. 이 값을 이용하여 SFRS의 허용응력을 계산하면 다음과 같다.

$$\text{압축연단에서의 허용압축응력: } f_{ca}=0.4 f_{ck}(\text{kg/cm}^2) = 126 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{식 3})$$

$$\text{인장연단에서의 허용인장응력: } f_{ta}=0.51 \sqrt{f_{ck}}(\text{kg/cm}^2) = 9.1 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{식 4})$$

2) 록볼트 제원 및 물성

록볼트의 직경은 2.5cm, 길이는 1등급, 2등급의 경우 4m, 3등급~6등급의 경우 5m를 사용한다. 초기인장은 가하지 않는 것으로 가정하였으며, 인발내력은 10ton으로 하였다. 암반 등급에 따라 록볼트의 중간격이 틀려지는데, 2차원 평면 변형을 조건으로 해석할 경우에는 탄성계수(E), 접합강성(Kbond, bond stiffness), 접합강도(Sbond, bond strength), 인장항복강도(Y_i , tensile yield strength)를 중간격으로 나누어 사용하여야 한다.

3.3 해석방법

터널의 굴착방법은 표 1에 나타난 바와 같이 암반 등급에 따라 달리 적용하였다. 비교적 암반이 양호한 1등급~4등급은 전단면 굴착을 하였으며, 암반이 불량한 5등급은 강관다단 그라우팅 후 전단면 굴착, 6등급은 강관다단 그라우팅 후 상·하 단면 분할굴착을 적용하였다. 5, 6등급은 터널 천단부에서 3m, 측벽부에서 3m의 범위에 강관다단 그라우팅을 실시하여 터널 상부 암반을 보강하였다. 6등급 암반에 상하단면 분할굴착 시 1단계 굴착 종료 후 및 굴착 완료 후에 각각 인버트를 설치하여 슛크리트에 의한 내하링(ring)을 형성하였다.

표 1 암반등급별 굴착 및 보강방법

1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	6등급
전단면굴착	전단면굴착	전단면굴착	전단면굴착	강관다단 후 전단면굴착	강관다단 후 상하단면 분할굴착 (인버트 설치)

4. 현 설계 적용시의 안정성 해석

4.1 소성영역

측압계수 0.5일 경우에는 주로 터널 측벽부에서 소성영역이 발생하는데, 암반등급이 저하될수록 그 규모가 증가하였고, 부분적으로 활동성 전단파괴영역도 관찰된다.

측압계수 2.0일 경우에는 터널 크라운상부와 바닥부에 소성영역이 발생하였다. 암반등급이 저하될수록 그 규모가 크며, 크라운부와 바닥부에는 활동성 전단파괴영역도 부분적으로 발달하고 있다.

측압계수가 0.5일 경우에는 수평응력 보다 큰 연직응력의 영향으로 측벽부에 응력 집중이 발생하여, 이에 따라 측벽부에서 파괴가 발생하며, 측압 계수가 2.0일 경우에는 연직응력 보다 큰 수평응력의 영향으로 터널 크라운부와 바닥부에 응력집중이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 지보재의 응력분포

그림 4, 5는 암반등급 3등급일 경우의 지보재의 응력분포를 도시한 것이다. 슛크리트 응력의 경우, 슛크리트의 두 면에 작용하는 응력 중 최대값을 도시한 것이며(+:압축), 록볼트 축력은 한 개의 록볼트 내에 작용하는 축력 중 최대값을 도시한 것이다.

스�크리트 응력에 대한 측압 계수의 영향을 살펴보면, 측압계수가 0.5인 경우에는 응력의 집중이 발생하는 측벽부에서 높은 값을 나타내고 있다. 반면 측압 계수가 2.0인 경우에는 대체로 크라운에서 높은 값을 보였다. 슛크리트에 작용하는 응력은 모두 허용 응력인 126 kg/cm^2 이내이며, 따라서 슛크리트의 파괴는 발생하지 않았다.

록볼트에 작용하는 최대 하중은 록볼트의 종간격을 1m인 경우로 환산하여 도시한 것이다. 그래프에 도시된 값들은 이러한 환산 과정을 거친 값이다.

록볼트에 작용하는 최대 하중의 분포 경향은 소성 영역의 발달과 깊은 관계가 있다. 소성영역의 분포와 록볼트 최대축력의 위치는 대체로 일치하였다.

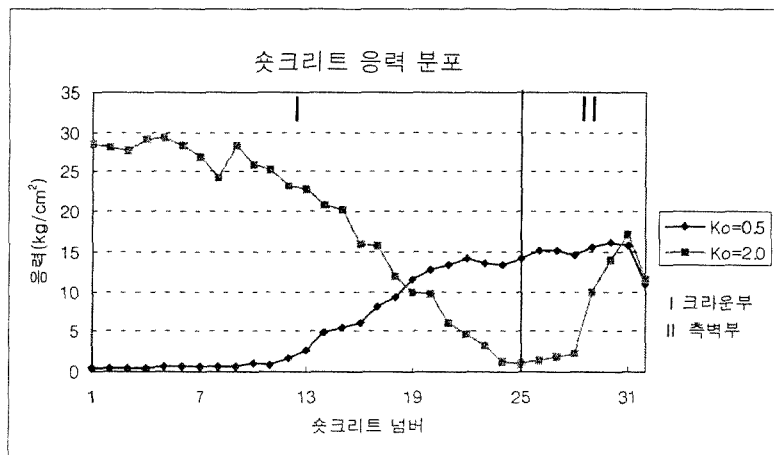


그림 4 암반등급 3등급일 경우의 슛크리트 응력분포

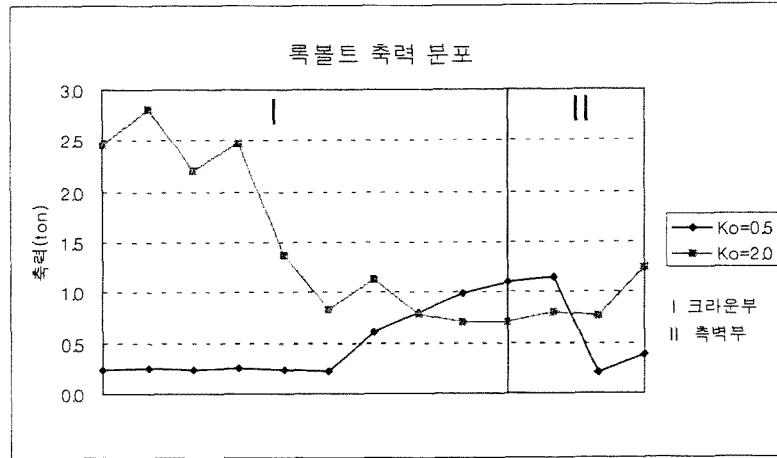


그림 5 암반등급 3등급일 경우의 록볼트 축력분포

4.3 해석 결과 요약

축압계수 및 암반등급별로 해석을 수행한 결과를 소성영역, 지보재의 응력분포를 중심으로 요약하면 다음의 표 2와 같다.

표 2 소성영역 분포 및 지보재의 응력분포

암반 등급	축압 계수	숏크리트응력 집중부	록볼트축력 집중부	소성영역 발생 위치
1	0.5	측벽부	크라운	측벽 하단에 소규모
	2.0	크라운	크라운과 측벽 경계	측벽 하단에 소규모
2	0.5	측벽부	크라운	측벽에 소규모
	2.0	크라운	크라운	크라운 및 바닥부
3	0.5	측벽부	측벽부	측벽부
	2.0	크라운	크라운	크라운 및 바닥
4	0.5	측벽부	크라운과 측벽 경계	측벽 및 바닥
	2.0	크라운	크라운	크라운 및 바닥
5	0.5	측벽부	강관다단 영역 하부의 측벽부	측벽 및 바닥
	2.0	크라운	강관다단 영역 하부의 측벽부	터널 주변 전반
6	0.5	크라운과 측벽 경계부 및 인버트부	상하단면 분할굴착 경계지점에서 축력집중	크라운부 제외한 터널 주변 전반
	2.0	크라운 및 인버트	크라운부 전반	터널주변 전반

5. 현실계 적용시의 안전율

5.1 측압계수 및 암반등급별 안전율

전단강도 감소기법을 적용하여 지반의 파괴 및 이에 따른 지보재의 파괴를 고려하여 안전율을 구하였다. 슛크리트의 경우 허용압축응력 f_{ca} 는 126 kg/cm^2 , 허용인장응력 f_{ta} 는 9.1 kg/cm^2 을 적용하여, 이 허용응력을 초과하는 경우에는 슛크리트가 파괴된 것으로 판별하였고, 록볼트의 경우 인발내력 10ton을 초과하는 경우에 파괴된다고 판별하였다.

본 연구에 사용된 전단강도 감소기법의 특성상 지반의 강도가 높은 1등급과 2등급의 암반에서는 안전율이 높게 나오며 암반등급이 저하될수록 안전율은 낮게 계산되었다.

또한 일반적으로 측압계수 0.5인 경우가 측압계수 2.0인 경우보다 안전율이 더 크게 확보되는 것으로 나타났다. 표 3은 측압계수 및 암반등급에 따른 터널의 안전율을 보여주고 있다.

표 3 측압계수 및 암반등급에 따른 터널의 안전율

암반등급 측압계수	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	6등급
$K_0=0.5$	6.23	3.97	2.69	1.79	1.23	1.13
$K_0=2.0$	6.41	3.81	1.97	1.23	1.07	1.01

5.2 측압계수 및 암반등급에 따른 소성영역

본 연구에 사용된 전단강도 감소기법의 특성상 안전율 발생시의 소성영역은 현 설계 안정성 해석 시 소성영역 분포와는 달리 암질이 양호할수록 그 규모가 크게 발생하였다.

측압계수가 0.5인 경우 터널 주위 전반에 걸쳐서 광범위하게 발생하였으나, 터널의 상부 지반과 하부 지반에서는 그 규모가 작게 발생하였고, 크라운부에서 지반의 우측 상부지반으로 올라가면서 발달하고, 측벽부와 바닥부에서 우측 하부지반으로 내려가면서 발달하였다. 활동성 전단파괴영역은 5등급 암반과 6등급 암반을 제외한 암반등급에서는 터널 주변 전반에 그 규모가 크게 발생하였고, 5등급 암반과 6등급 암반의 경우는 측벽부에서 우측 상부지반으로 올라가면서 발달하였다.

또한 측압계수가 2.0일 경우에도 터널 주위 전반에 걸쳐서 광범위하게 발생하였으나, 측벽부에는 그 규모가 작게 발생하였고, 크라운부 상부의 지반과 바닥부 하부의 지반에 그 규모가 크게 발달하였다. 활동성 전단파괴영역은 1등급 암반과 2등급 암반의 경우에는 터널 주변 전반에 그 규모가 크게 발달하였으나, 1등급 암반과 2등급 암반을 제외한 암반등급에서는 터널 경계부에서 부분적으로 발달하였다.

5.3 지보재의 파괴영역

그림 6, 7은 암반등급 3등급일 경우의 지보재의 응력분포를 도시한 것이다. 지반의 파괴에 따른 소성영역과 활동성 전단 파괴영역의 발생으로 인하여, 지보재는 지지력을 초과하는 힘을 받게 되어 파괴되었다.

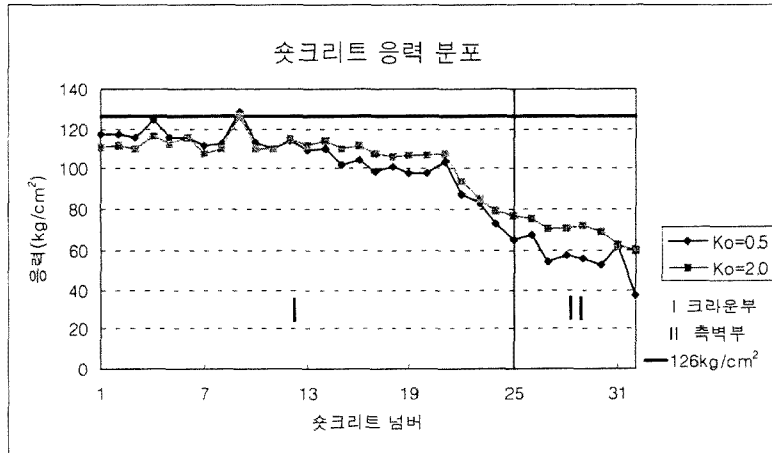


그림 6 암반등급 3등급일 경우의 슛크리트 응력분포

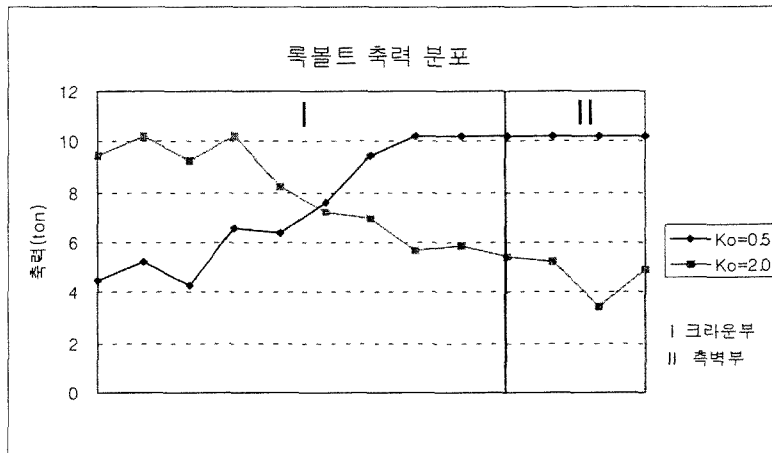


그림 7 암반등급 3등급일 경우의 록볼트 축력분포

6. 결론

본 연구에서는 전단강도 감소기법을 이용하여 지보재의 파괴를 고려한 터널의 안전율을 계산하는 알고리즘을 개발하였고, 마제형 2차선 도로 터널을 대상으로 축압계수 및 암반등급을 달리하면서 안전율을 구하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지반의 파괴 및 지보재의 파괴를 고려하여 터널에 대한 안전율의 개념은 터널 전체의 안정성을 나타내는 지표로 사용될 수 있었다.
2. 안전율은 측압계수가 0.5인 경우가 측압계수 2.0인 경우보다 높게 나타났으며, 암질이 양호할수록 높게 계산되었다.
3. 현 설계에 대한 안정성 해석 결과, 소성영역의 발생 위치는 측압계수에 따라 변하였는데, 측압계수가 0.5인 경우에는 측벽부에서 발달하였고, 측압계수가 2.0인 경우에는 라운부와 바닥부에서 발달하여 상하로 길게 분포하였다.
4. 지보재 파괴 발생 시점의 해석결과를 살펴보면, 소성영역의 분포는 현 설계에 대한 해석결과와 유사하지만, 그 규모는 암질이 양호할수록 크게 확대되었다.
5. 현 설계에 대한 안정성 해석 시 지보재는 지지력 이내의 힘을 받고 있어서 파괴되지 않았지만, 암질이 가장 불량한 6등급 암반의 경우 록볼트의 최대 축력은 임계치에 도달하고 있어 록볼트 설치 간격을 줄이거나 길이를 늘여야 할 필요성이 있었다.
6. 지보재 파괴 발생 시점에서 해석을 하였을 경우, 지반의 파괴에 따른 소성영역과 활동성 전단 파괴영역의 발생으로 인하여 지보재는 지지력을 초과하는 힘을 받게 되어 파괴되었다.

본 연구를 통하여 마제형 2차선 도로터널을 측압계수 및 암반등급별로 지반의 파괴 및 이에 따른 지보재의 파괴영역을 확인하여 안전율을 구할 수 있었다. 암반 등급별 안전율로부터 지보재 설치량의 과다를 판별하여, 안전율이 높은 암반등급에서의 터널 굴착 시는 경제적 시공을 위해 지보재를 감소시킬 필요성이 있으며, 안전율이 낮은 암반등급에서의 터널 굴착 시는 터널의 안전율 향상을 위해 지보재 파괴영역에 지보재의 보강을 통한 안전율 향상을 꾀하여야 할 것으로 판단된다.

향후 보다 현실성 있는 해석을 위해서는 절리의 분포 및 거동을 고려한 암반구조물의 안정성 평가가 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

1. 박상찬, 문현구.(1998), “지하공동의 형상과 규모가 공동의 안정성에 미치는 영향 연구”, 한국지반공학회지, vol. 14, No.1, pp.93~107.
2. 박연준, 유광호.(1998), “편재 절리모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석”, 터널과 지하공간, vol. 8, No. 4, pp.287~295.
3. 유광호, 박연준, 배규진. (2000), “연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율평가”, 터널기술 vol. 2, No. 3, pp.47~57.
4. 박연준. (2000), “토목기술자를 위한 암반공학”, 한국지반공학회, 지반공학시리즈11, 구미서관 pp371~412.
5. 유광호. (2000) “토목기술자를 위한 암반공학”, 한국지반공학회, 지반공학시리즈11, 구미서관 pp413~458.
6. 정대열. (1993), “터널 막장 주위의 3차원 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중

- 분배율에 관한연구”, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
7. 이연규, 서영호, 이정인. (1993), “연약암반에 굴착되는 지하철 터널의안정성 해석”, 터널과 지하공간, vol. 3, pp.118~131.
 9. 박연준, 채영수, 유광호, 백영식.(1999) “절편법과 유한차분법에 의한 사면안정해석 비교연구” 한국지반공학회 논문집 vol. 15, No. 6, pp263~272
 12. 한국도로공사 도로 연구소(2001). “강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립Ⅱ”
 13. Bishop A. W.(1955), “The use of the slip circle in the stability Analysis of slope” , Geotechnique, vol. 5, pp.7-17
 14. Dawson E. M. & W. H. Roth, & A. Drescher. (1998), “Slope Stability Analysis with Finite Element and Finite Difference Methods” , submitted to Geotechnique, June.
 15. Duncan J. M. (1996), “State of the Art Limit Equilibrium and Finite-element Analysis of Slopes” , J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. vol. 122, No.3 pp.577~596
 16. Barton, Permanent support for tunnels using NMT, 한국암반역학회 및 대한지질 공학회 학술발표회, 1995년. pp 1~26
 17. Barton, N. 1995. The Influence of Joint Properties in Modelling Jointed Rock Masses. Keynote Lecture, 8th ISRM Congress, Tokyo, vol. 3