

연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가

An Assessment of Safety Factor for Tunnels Excavated in a Weak Rock Layer



유광호^{*1}
You, Kwang-Ho



박연준^{*1}
Park, Yeon-Jun



배규진^{*2}
Bae, Gyu-Jin

Abstract

It is difficult to calculate factor of safety of a tunnel by applying any analytical method based upon limit equilibrium method since the shape of failure plane in tunnel analysis can not be easily assumed in advance. To cope with this shortcoming, a method is suggested to calculate safety factor of a tunnel by numerical analysis using strength reduction technique. A circular tunnel excavated in a homogeneous rock was selected as an example problem and factors of safety were calculated for no-supported, partly-supported, and completely-supported cases respectively. Meshes with 3 different sizes were examined for a sensitivity analysis. For the verification of the proposed method, a limit equilibrium analysis was conducted and compared with the numerical analysis. The proposed method herein can be used to calculate factor of safety of a tunnel regardless of tunnel shape or geological conditions, and thus can contribute for the improved design and stability assessment of tunnels.

Keywords : Strength reduction technique, Factor of safety, tunnel, Limit equilibrium method

^{*1} 수원대학교 토목공학과 교수

^{*2} 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

요 지

터널의 파괴는 사면의 경우처럼 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 한계평형법에 기초한 해석법을 적용하여 안전율을 구하기가 곤란하다. 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위하여 강도감소기법을 이용한 수치해석기법에 의해 터널의 안전율을 구하는 방법을 제시하였다. 균질한 암반에 굴착된 원형터널을 가정하여 무보강, 부분보강 및 인버트의 완전한 폐합의 경우에 대하여 안전율을 계산하였으며, 요소망의 크기에 따른 민감도 분석을 위해 크기가 다른 3가지의 요소망을 사용하여 계산 결과를 비교하였다. 제안된 방법의 검증을 위해, 특정한 파괴 활동면을 갖는 경우에 대해 한계평형해석을 수행하여 수치해석 결과와 비교하였다. 본 논문에서 제안한 터널의 안전율 계산 방법은 터널의 형상이나 암반의 상태에 관계없이 적용될 수 있으므로 향후 터널 설계 및 안정성 평가에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

주요어 : 강도감소기법, 안전율, 터널, 한계평형해석

1. 서론

사면의 안전율은 Bishop법, Spencer법, Morgenstern and Price법, Janbu의 엄밀해법 등과 같은 한계평형법(Limit equilibrium method)을 이용한 해석법이 널리 이용된다. 이 들 해석법들은 토사사면의 안전율을 구하는데 사용되는데, 임의의 활동면들을 가정하여 안전율을 계산한 후, 최소 안전율을 주는 활동면을 찾아냄으로써 안전율을 구한다.

유한요소법에 의한 사면 안정해석 시 사면의 안전율을 효율적으로 구하는 방법에는 사면을 구성하는 지반의 실제 강도를 유지한 상태에서 사면의 자중(중력)을 점진적으로 증가시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 자중(중력)비로서 안전율을 구하는 자중증가법과 실제 중력을 가한 상태에서 지반의 강도를 감소시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 강도비로서 안전율을 구하는 강도감소법이 알려져 있다(김영민, 1999; 서영교, 2000). 이 방법들은 사면의 파괴활동면을 미리 가정하지 않고, 해석 결과로서 안전율과 파괴활동면이 동시에 구해지는 장점이 있다.

자중증가법을 사질토에 적용하는 경우 자중의 증가로 전단응력 보다 수직 구속압이 더 빨리 증가하게되어 사면이 파괴되지 않을 수 있는 반면, 강도감소법은 모든 토질에 적용될 수 있는 안정된 방법이다(서영교, 2000). 김영

민(1999)과 서영교(2000)는 유한요소법에 의해 구한 사면의 안전율이 한계평형법에 근거한 절편법 보다 안전측으로 계산됨을 보였다. 또한 Dawson 등(1999)은 강도감소기법(strength reduction technique)에 의해 사면의 안전율(Factor of Safety)을 체계적으로 구하는 방법을 제안했으며, 박연준과 Dawson(1997), 박연준과 유광호(1998)는 절리가 발달한 암반사면의 안전율을 구하기 위해 2조의 절리군을 고려할 수 있는 편재절리모델(ubiquitous joint model)을 개발하였다.

터널의 경우는 사면의 경우와는 달리 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 한계평형법에 기초한 해석법 등을 적용하여 안전율을 구하기가 곤란하다. 이러한 이유에서 터널을 대상으로한 수치해석은 안전율을 구하기보다는 안정성을 평가하는 데만 제한적으로 사용되어 왔다.

본 연구에서는 수치해석에 의해 터널의 안전율을 구하는 방법이 제시되었다. 또한, 특정한 파괴 활동면을 갖는 경우에 대하여 한계평형해석을 수행하여 그 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 균질한 암반에 굴착된 원형터널을 예제로 사용하였고, 해석에 사용되는 요소망의 크기에 따른 해석결과의 민감도 분석을 위해 크기가 다른 3가지의 요소망을 사용하여 요소망의 크기에 따른 안전율의 변화 양상을 살펴보았다. 또한, 인버트를 폐합하지 않은 부분 보강의 경우와 인버트를 폐합한 경우에 대해 안전율을

구하여 보강효과를 비교하였다.

본 논문에서는 균질한 암반에 굴착된 원형터널을 예제로 하였지만, 제안된 방법은 터널의 형상이나 암반의 상태에 관계없이 적용될 수 있으며, 앞으로 본 논문에서 제안된 터널의 안전율을 계산하는 방법이 터널 설계와 안정성 평가에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 터널의 안전율

수치해석에 있어, 각 요소에서의 응력상태는 주응력 σ_1 과 σ_3 에 의해 표현될 수 있다. 일반적으로 이 응력상태는 $\sigma - \tau$ 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원(a)로 그려진다. 이 원이 파괴면(failure envelope)에 접하게 될 때 파괴가 발생한다. 원(a)에 의해 표현된 응력상태에서 파괴가 발생하려면 σ_3 는 그대로 유지하면서 원(b)와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다(Itasca Consulting Group, 1999). 또한, 원(a)에 의해 표현된 응력상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원(c)와 같이 파괴면에 접할 때까지 응력원의 반지름을 증가시킴으로써 파괴에 도달할 수도 있다. 두 원의 반지름 비 ($F = \frac{R_2}{r}$ or $\frac{R_1}{r}$)는 주어진 응력 상태에서 일종의 강도/응력비 (strength/stress ratio)에 해당하며, 종종 안전율(Factor of Safety)이라고도 일컬어진다.

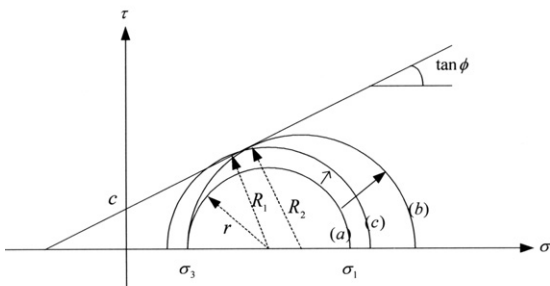


그림 1. 수치해석의 안전율 계산

이와 같은 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는 데에는 효과적이며, 터널의 안정 해석 시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴양상이나 보강이 필요한 부분을 찾아내는데 사용될 수 있다. 하지만, 터널의 전반적인 안정성을 나타내지는 못한다.

3. 강도감소법

사면이나 독, 제방 등에 있어서 안전율 F 는 '파괴를 막을 수 있는 최소 전단강도와 실제 지반의 전단강도와'의 비라고 정의된다(Bishop, 1955). 즉 안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 사면이 붕괴될 때의 가상 지반 강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율 F 는 Duncan(1996)이 지적했듯이 지반의 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다.

유한요소법을 이용한 사면해석에서 안전율은 실제 지반의 강도를 사면의 파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다. 이러한 강도감소기법은 현재 흔히 쓰이고 있는 절편법(method of slice)에 비하여 여러 가지 장점이 있다. 가장 큰 장점은 임계파괴면이 자동으로 찾아지기 때문에 임계파괴면의 기하학적 형태를 사전에 원호, log spiral, 부분선형 등으로 가정할 필요가 없다는 점이다. 만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 연상유동법칙(associated flow rule)이 적용될 경우, 강도감소기법으로 구해진 안전율은 분할법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성정수나 초기응력, 혹은 응력 경로와 무관하다 (Dawson 등, 1999).

강도감소기법은 이미 1975년에 Zienkiewicz 등에 의하여 사용된 바 있으며, 그 이후에도 Naylor (1982), Giam & Donald (1988), Matsui & San (1988, 1992), Ugai (1989), Kobayashi (1990), Ugai & Leshchinsky

(1995), 김영민(1999) 등에 의하여 사용된 바 있다.

터널안정 해석에서 강도감소기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 를 시험 안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하여 터널의 안전율을 구한다. 이때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치는 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

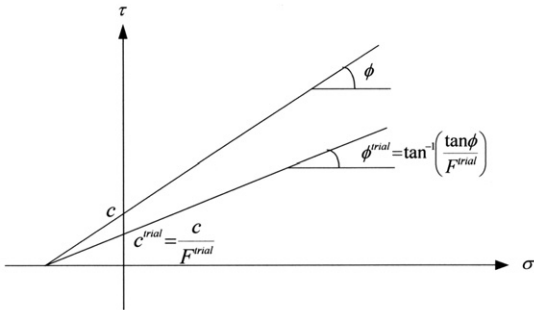


그림 2. 전단강도와 시험 전단강도와의 관계

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

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

이 때 파괴포락선과 시험 안전율에 의해 감소된 파괴포락선은 그림 2에 도시된 바와 같이 동일한 인장강도 점에서 단지 기울기만 감소한 직선을 나타내게 된다. 한계평형 해석에서는 인장파괴를 고려하지 않으므로 인장강도는 변화시키지 않는다. 그러나 터널 해석 시에는 필요에 따라 동일한 방법으로 인장강도도 감소시킬 수 있다.

4. 쏫크리트의 허용응력

수치해석에서 쏫크리트는 빔(beam)요소로 취급되며, 해석 프로그램에 따라 탄성체나 탄소성체로 가정하게 된다. 만약 쏫크리트가 탄성체로 가정된다면, 쏫크리트로

보강된 터널 해석 시 쏫크리트는 파괴되지 않기 때문에 강도감소기법에 의해 구한 터널의 안전율은 실제 보다 과대 평가될 수 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 빔 요소의 파괴를 해석에 고려해야 하는데, 허용강도설계법을 사용하는 것이 한가지 방법이다.

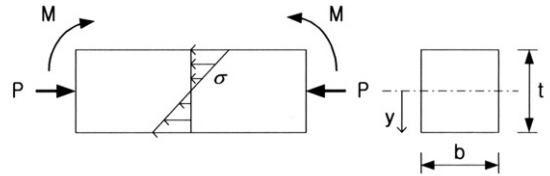


그림 3. 부재 내에 작용하는 응력

그림 3은 사각형 단면을 갖는 축력과 모멘트를 받는 구조부재 내부에 발생하는 응력 분포를 보여준다. 이 때 각 지점에서의 응력은 다음 식에 의해 구해진다.

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{My}{I} \quad (3)$$

여기서, P 는 축력, b 는 폭, t 는 두께,
 A 는 부재의 단면적($=b \times t$),
 M 은 휨모멘트,
 y 는 중립축으로부터 거리이고,
 I 는 단면 2차 모멘트($=b \times t^3/12$)이다.

그림 3에서 알 수 있듯이, 최대압축응력(σ_c)과 최대인장응력(σ_t)은 $y=t/2$ 인 상부면과 하부면에서 발생한다

허용휨압축응력(σ_{cy})과 허용휨인장응력(σ_{ty})은 설계기준강도를 σ_{ck} 라 하면 다음 식으로 구해질 수 있다 (건설교통부, 1999, pp.264-265).

$$\begin{aligned} \sigma_{cy} &= 0.4 \alpha_s, \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \\ \sigma_{ty} &= 0.42 \sqrt{\sigma_{ck}}, \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (4)$$

예를 들어, 설계기준강도를 210kgf/cm^2 로 하면, 허용압축응력은 84kgf/cm^2 , 허용인장응력은 6kgf/cm^2 가 된다. 따라서, 빔요소의 최대압축강도가 허용압축응력을 초과하거나 최대인장강도가 허용인장강도를 초과하게 되면 그 빔요소는 파괴된 것으로 판단할 수 있다.

5. 안전율의 계산 routine

본 연구에서는 비교적 빨리 안전율을 구할 수 있는 증분탐색(incremental search)방법을 사용하였다. 이 방법은 먼저 안전율의 시작값(F^{start})과 증분값(F^{inc})을 정한다. 이때 시작값은 전산해석 결과가 평형상태에 도달하는, 즉

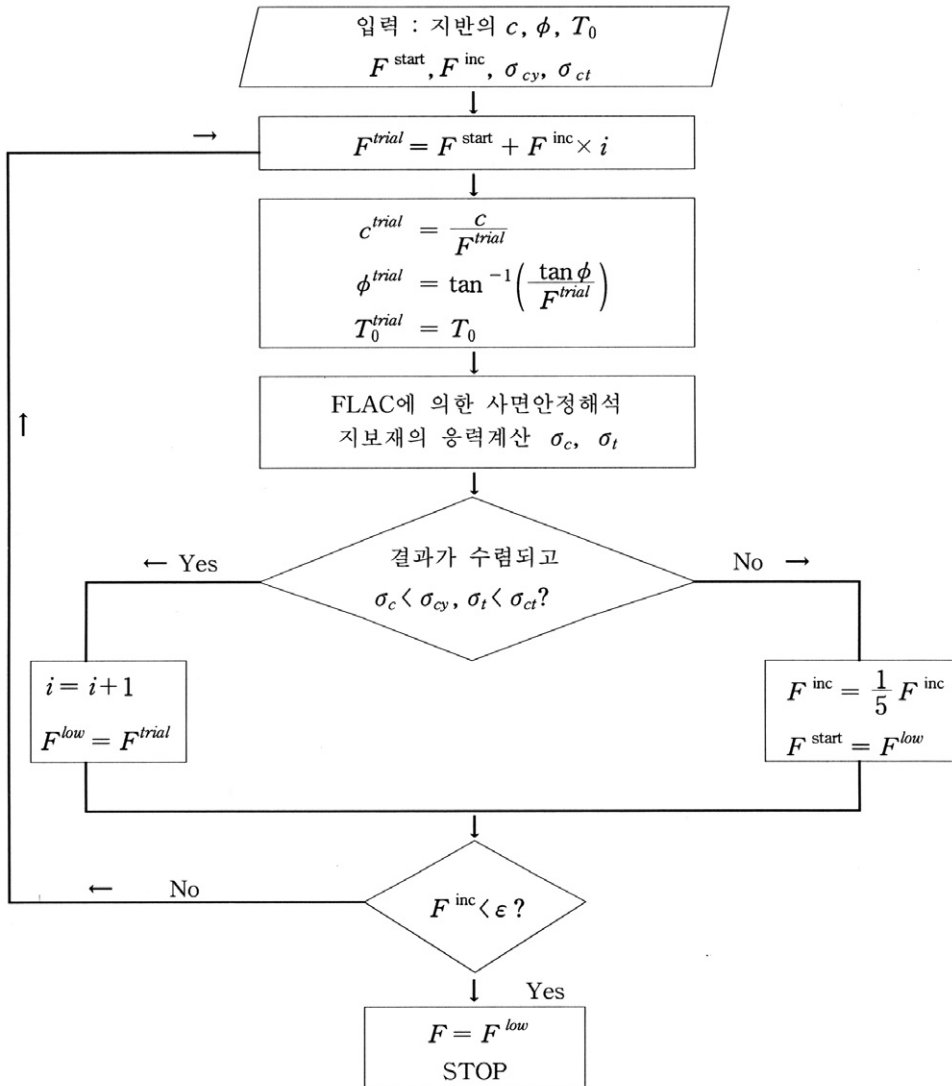


그림 4. 안전율 계산과정의 흐름도

사면의 파괴가 발생치 않는 시험 안전율이 되며, 증분값은 원하는 안전율의 정확도에 따라 정해지는데, 해석과정에서 단계별로 감소시킬 수 있다. 예를 들면, 첫 단계에서 증분값을 1.0, 다음 단계에서 증분값을 1/5로 감소시킨 0.2, 또 다음 단계에서 1/10으로 감소시킨 0.02 등을 사용하여 단계별로 최종 안전율의 정확도를 증가시킬 수 있다. 각 단계에 있어서, 해석결과가 수렴하게 되면 사면의 파괴가 발생하지 않는 것이므로 시험 안전율(F^{trial})은 증분값 만큼 증가되고, 이 때 시험안전율은 F^{low} 로 저장된다. 반대로 해석결과가 수렴하지 않으면, 이 시험 안전율은 실제 안전율 보다 높은 값이므로 이 값은 바로 전 단계의 안전율인 F^{low} 로 대체되고, 여기서부터 다음 단계로 넘어가 감소된 증분값을 사용하여 안전율을 구하게 된다. 이 같은 과정을 안전율 증분이 충분히 작을 때까지 되풀이하여 최종 안전율을 구하게 된다.

쏿크리트 지보재가 보강된 경우에는, 해석결과가 수렴하게 되더라도, 파괴가 된 빔요소가 있는지를 검색하여 빔요소가 파괴된 경우에는 터널이 불안정한 것으로 판단한다. 안전율을 계산하는 과정을 도식적으로 나타내면 그림 4와 같다.

6. 수치해석

본 연구를 위해 유한차분법에 근거를 둔 범용 지반 해석 프로그램인 FLAC을 사용하였고, 체계적으로 안전율을 구하기 위해 그림 4에 나타난 개념에 따라 FLAC의 FISH routine을 작성하여 사용하였다. 그림 5와 같은 해석단면을 설정하여 해석을 실시하였다. 해석 터널은 반지름이 5m인 원형터널로 하였으며, 좌우 경계는 수평변위를, 바닥 경계는 수직변위를 구속하였다. 대상지반은 연약한 암반으로 가정하여 그림 5에 표기된 물성치를 사용하였으며 초기 수평-수직 응력비는 1.0으로 하였다. 또한 요소의 크기가 해석 결과에 미치는 영향을 살펴보기

위해서 그림 6에서 8까지에 나타난 바와 같이 각각 터널 주변부의 요소망 크기를 0.5m, 1.0m, 2.0m인 3가지를 사용하였고, 계산속도를 향상시키기 위해 터널 중심으로 부터 멀리 떨어질수록 요소망 간격이 넓어지도록 하였다.

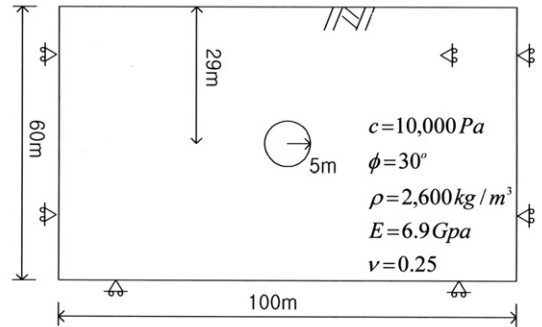


그림 5. 해석단면 및 해석 물성치

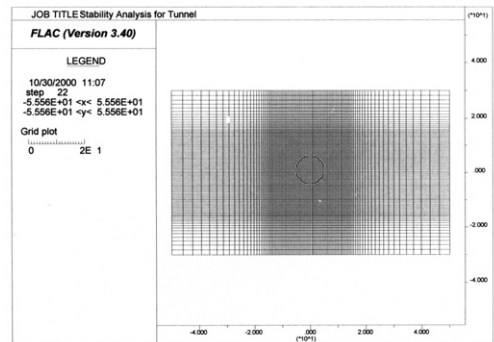


그림 6. 터널 주변부의 간격이 0.5m 인 요소망

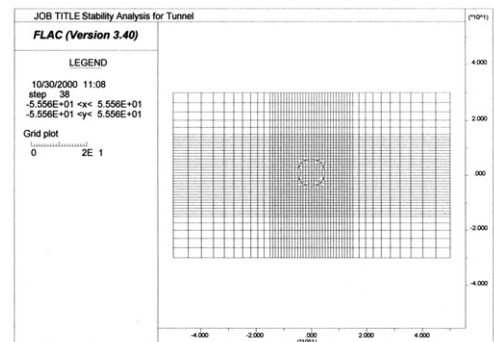


그림 7. 터널 주변부의 간격이 1.0m 인 요소망

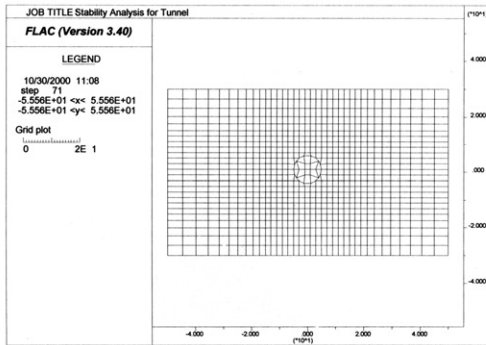


그림 8. 터널 주변부의 간격이 2.0m 인 요소망

한편, 터널이 20cm 두께의 슛크리트로 보강될 경우의 보강효과를 검증하였다. 이를 위해 원형 터널 주변을 모두 폐합하여 보강하는 전체보강과 인버트 부분만을 제외하고 보강하는 부분보강에 대해 해석을 수행하였다. 슛크리트는 수치해석 시에 빔요소로 취급되었으며, 사용된 입력 물성치는 다음과 같다.

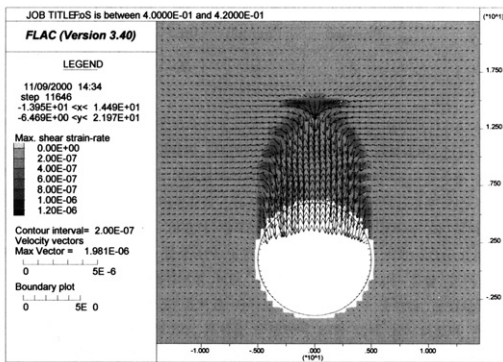


그림 9. 무보강 터널의 한계상태 시 전단변형률 속도 및 속도벡터 (요소망 간격 0.5m)

그림 9와 그림 10은 터널 주변부의 요소망 간격이 각각 0.5m와 2m인 경우, 무보강 터널의 한계 상태에서의 터널주변의 전단변형률 속도(shear strain rate)와 속도 벡터도를 보여준다.

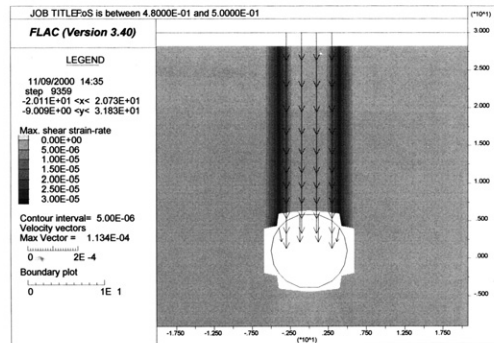


그림 10. 무보강 터널의 한계상태 시 전단변형률 속도 및 속도벡터 (요소망 간격 2m)

표 1. 슛크리트의 물성치

탄성계수 (GPa)	두께 (cm)	허용압축응력 (kg/cm ²)	허용인장응력 (kg/cm ²)
5	20	84	6

그림 9와 그림 10에서 볼 수 있듯이, 0.5m 요소망 간격을 사용했을 경우는 터널 상부의 높이 약 14m와 터널 폭 (10m)을 갖는 아치 형태의 암반이 붕락하는 결과를 나타 내며, 2.0m 요소망 간격을 사용했을 경우는 터널 직상부로부터 지표면까지의 전체 암반이 붕락하는 결과를 보여 준다. 0.5m 요소망의 경우 지반의 강도는 초기 가정값의 1/0.42이며, 2.0m 요소망의 경우 강도는 초기 가정값의 1/0.5이다. 즉 한계 상태에서의 지반의 강도는 0.5m 요소망의 경우가 더 크며, 이 강도에서 2.0m 요소망에 대한 해석은 파괴가 발생하지 않는 것으로 나타난다. 이는 2.0m 요소망의 경우 요소의 크기가 과대하여 파괴면 근처에서처럼 지반 내 응력의 변화가 매우 심할 경우 이를 올바르게 따라가지 못하기 때문이며, 결과적으로 올바른 파괴모드를 나타내지 못한다. 동일한 지반강도(안전율 0.5인 경우)에 대하여 0.5m 요소망으로 해석을 수행하여 그림 11에 도시하였다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 동일한 강도에서 파괴모드는 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다. 즉 요소망의 크기가 어느 정도 이상 커지면 올바른 안

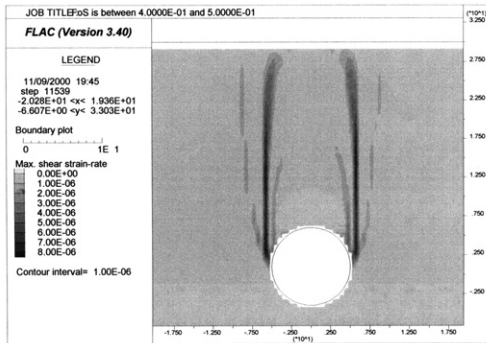


그림 11. 안전율 0.5에 해당하는 지반의 경우 무보강 터널 파괴 시 전단변형률 속도 (요소망 간격 0.5m)

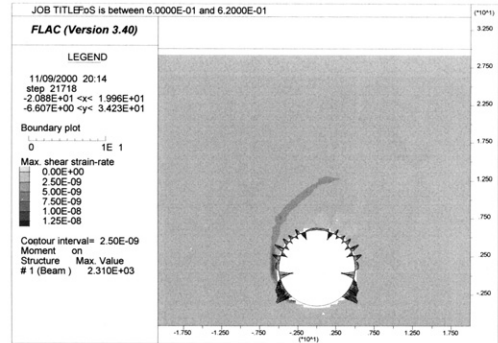


그림 13. 부분보강의 경우 터널의 한계상태 시 전단변형률 속도 및 지보재의 모멘트 분포 (요소망 간격 0.5m)

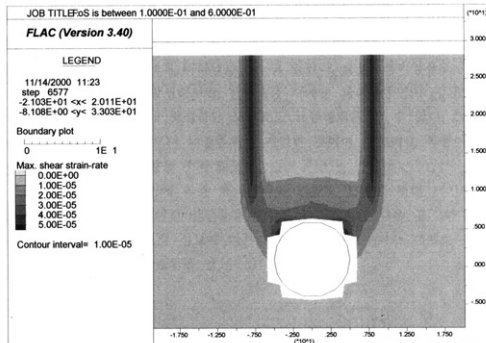


그림 12. 안전율 0.6에 해당하는 지반의 경우 무보강 터널 파괴 시 전단변형률 속도 (요소망 간격 2.0m)

전율의 계산은 물론이고 올바른 파괴모드도 구할 수 없음을 알 수 있다.

그림 12는 안전율 0.6에 해당하는 지반($c=16,667\text{Pa}$, $\phi=43.9^\circ$)에 대하여 요소망 간격을 2.0m로 해석했을 때, 무보강 터널 주변부의 전단변형률 속도(shear strain rate)를 보여준다. 이 경우 파괴면이 터널폭 보다 넓게 확대되어, 직상부 지표까지 연장됨을 볼 수 있다.

그림 11의 경우와 비교해보면 터널 상부의 붕락 영역이 넓어졌음을 알 수 있다. 따라서 지반의 강도가 낮을수록 붕락 영역이 넓어지고, 지표에서의 영향범위도 확대됨을 알 수 있다.

그림 13과 그림 14는 터널을 20cm 두께의 슛크리트로 인버트 부분만을 제외하고 보강하는 부분보강과 인버트를 폐합하여 전체보강을 했을 경우의 안전율 해석 결과를 전단변형률 속도 및 지보재에 발생한 모멘트 분포함께 도시한 것이다. 인버트를 폐합한 경우의 안전율은 2.21로 인버트를 폐합하지 않은 경우의 안전율 0.61의 3.6배 이상이며 무보강의 경우(안전율 0.41)의 5.4배이다. 반면 인버트를 폐합하지 않은 경우의 안전율은 무보강의 경우에 비해 30% 정도밖에 증가하지 않아, 인버트 폐합효과가 예상대로 매우 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 파괴양상도 부분보강 시에는 터널 상부에서 국부적인 파괴가 발생하지만 전체보강 시에는 파괴활동면이 지표면까지 연장되고 붕락 영역도 넓게 되며, 슛크리트에 발생하는 모멘트도 균등해짐을 알 수 있다. 그림 14에 도시된 바와 같은 파괴 모드는 터널 내부로의 내공변위에 기인한 것이며 슛크리트 복공이 파괴되지 않는 한 터널 자체의 안정성에는 큰 영향을 주지 않는다.

해석에 사용되는 요소망의 크기에 따른 해석결과와 민감도 분석을 위해 크기가 다른 3가지의 요소망을 사용하였다. 해석결과 얻어진 안전율을 종합해서 정리하면 다음 표 2와 같고, 이를 그래프로 도시하면 그림 15와 같다. 보강 정도에 따른 안전율의 증가 추이는 대체로 유사하지만 요소망의 크기가 작을수록 안전율이 감소함을 알 수 있다.

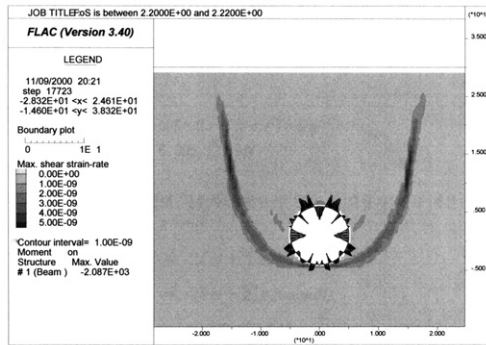


그림 14. 전체보강의 경우 터널의 한계상태 시 전단변형을 속도 및 지보재의 모멘트 분포 (요소망 간격 0.5m)

표 2. 지보재의 보강 시 계산된 안전율

요소망 간격	0.5m	1.0m	2.0m
무보강	0.41	0.45	0.49
부분보강	0.61	0.73	0.77
전체보강	2.21	2.31	2.29

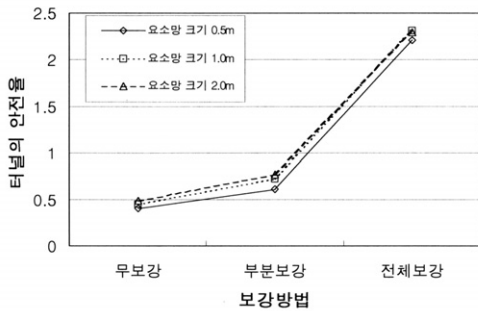


그림 15. 지보재 보강 시 보강효과

본 연구에서 제안된 터널의 안전율 계산 기법의 검증을 위해 그림 10의 해석결과를 이용하여 한계평형방법에 의한 안전율과 비교하였다. 이를 위해 그림 10의 파괴양상을 그림 16과 같이 이상화하였다. 이 때 파괴를 유발하는 힘(driving force)은 터널 상부 지반의 자중(W)이며, 다음과 같이 계산된다.

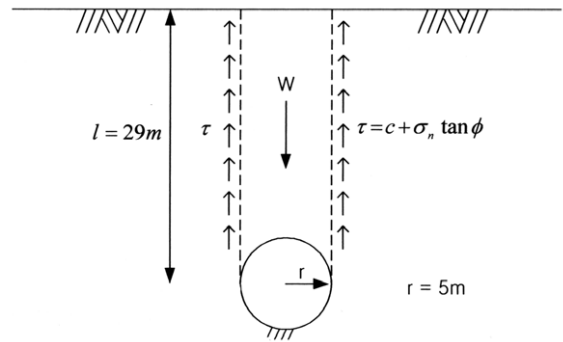


그림 16. 터널 파괴의 한계평형 해석

$$W = (l \times 2r - \frac{1}{2} \pi r^2) \times \rho g$$

$$= 6,395,121.7 \text{ N} \quad (5)$$

한편, 이 힘에 저항하는 힘은 파괴면에 작용하는 전단력(S)으로 다음과 같이 계산된다.

$$S = 2 \int \tau dl = 2(c l + \int \sigma_n \tan \phi dl)$$

$$\simeq 2(c l + \Sigma \sigma_n \tan \phi \Delta l)$$

$$= 3,132,869.7 \text{ N} \quad (6)$$

여기서, σ_n 은 터널 굴착 후 파괴면에 작용하는 수직응력으로서 수치해석 결과로부터 구한 각 요소에서의 σ_{xx} 이며, Δl 은 각 요소의 연직방향 길이이다. 또한 c와 ϕ 는 각각 암반의 전단강도와 내부 마찰각으로 10,000 Pa와 30° 이다.

따라서, 안전율은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\text{안전율} = \frac{\text{Resisting Force}}{\text{Driving Force}} = 0.49 \quad (7)$$

이 값은 수치해석에 의해 구한 0.49와 일치하는 값으로 파단면이 형성된 경우에는 한계평형해석이 가능하며 그 결과는 수치해석 결과와 동일함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 수치해석기법이 터널의 안전율 계산에 유용하게 사용될 수 있다고 생각된다.

7. 결론

본 논문에서는 강도감소기법을 이용한 수치해석에 의해 터널의 안전율을 구하는 방법이 제시되었다. 균일한 암반에 굴착된 원형터널을 예제로 사용하였고, 해석에 사용되는 요소망의 크기에 따른 해석결과의 민감도 분석을 위해 크기가 다른 3가지의 요소망을 사용하여 안전율을 구하였다. 해석 결과 보강 정도에 따른 안전율의 증가 추이는 대체로 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 하지만 요소망의 간격이 작을수록 안전율이 감소되며, 또한 파괴 모드도 요소망의 크기에 따라 다르게 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 정확한 터널의 안전율 계산을 위해서는 요소망의 크기가 일정 수준 이하로 되어야 함을 알 수 있었다.

한편, 슛크리트 보강한 경우의 보강효과를 안전율의 증가로 정량화 할 수 있었다. 인버트를 폐합하지 않은 경우에는 보강효과가 그다지 크지 않게 나타난 반면, 인버트를 폐합하여 전체를 보강한 경우에는 보강효과가 매우 크게 나타남을 알 수 있었다.

또한 특정한 파괴 활동면을 갖는 경우에 대해 한계평형 해석을 수행하여 본 연구에서 제안된 방법에 의해 구한 값과 비교하였다. 두 결과는 잘 일치하여 향후 터널의 안전율 계산에 유용하게 사용될 수 있다고 생각된다.

본 논문에서는 균질한 암반에 굴착된 원형터널을 예제로 하였지만, 제안된 방법은 터널의 형상이나 암반의 상태에 관계없이 적용될 수 있다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (1999) 콘크리트 구조 설계기준, 한국콘크리트학회, 276p.
2. 김영민 (1999) "유한요소법에 의한 사면붕괴 거동해석에 미치는 영향분석", 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제5호, pp.19-28.

3. 박연준, 유광호. (1998) "편재절리모형을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석", 터널과 지하공간, 제8권, 제4호, pp.287-295.
4. 박연준, Dawson, E. M. (1997) "편재절리모형의 유용성과 한계성", 터널과 지하공간, 제7권, 제3호, pp.202-207.
5. 서영교 (2000) "유한요소법과 연속체역학을 이용한 사면안정해석", 한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, pp.134-142.
6. Bishop, A. W. (1955) "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", Geotechnique, Vol. 5, pp.7-17.
7. 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.
8. Dawson, E. M., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999) "Slope stability analysis by strength reduction", Geotechnique, Vol. 49, No. 6, pp.835-840.
9. Giam, S. K. & Donald, I. B. (1988) "Determination of critical slip surfaces for slopes via stress-strain calculations", Proc. Fifth Australia-New Zealand Conference on Geomech., Sydney, Australia, pp.461-464.
10. Itasca Consulting Group, Inc. (1999) FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.4., Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
11. Kobayashi, M. (1990) A study on application of finite element method to stability and settlement analysis in geotechnical engineering. Technical Note of PHRIMT, Japan, No. 1 (in Japanese).
12. Matsui, T. & San, K. C. (1992) "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", Soils and Found. Vol. 32, No. 1, pp.59-70.
13. Naylor, D. J. (1982) "Finite elements and slope stability", Numer. Meth. in Geomech., Proc. NATO Advanced Study Institute. Lisbon, Portugal, pp.229-244.
14. Ugai, K. (1989) "A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM", Soils and Foundations Vol. 29, No. 2, pp.190-195 (in Japanese).
15. Ugai, K. & Leshchinsky, D. (1995) "Three-

dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a comparison of results", Soils and Foundations, Vol. 35, No. 4, pp.1-7.

16. Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. & Lewis, R. W. (1975) "Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics", Geotechnique Vol. 25 No. 4, pp.671-689.