

터널의 안전율 평가 기법에 관한 연구

박종원¹⁾, 박연준^{2)*}, 유광호²⁾, 이상돈³⁾

A Study on the Assessment of Safety Factor of Tunnels

Jong-Won Park, Yeon-Jun Park, Kwang-Ho You and Sang-Don Lee

Abstract The purpose of this research is to establish a concept of the factor of safety of tunnels which is a quantitative estimate of the stability of tunnels. Based on this concept, a numerical technique which calculates the factor of safety of tunnels was developed. To obtain the safety factor of a tunnel, the strength reduction technique in which a series of analyses are repeated with reduced ground strength until the tunnel collapses were employed. With this technique, the failure plane, as well as the factor of safety, can be obtained without prescribing the trial failure plane. Analyses were conducted with FLAC^{2D}(ver3.3), a geotechnical analysis program which is based on the finite difference method. From the result, the location of plastic zones, the maximum convergence and the maximum stress generated in the support system were also analyzed. The result shows that factors of safety are higher for the 1st and 2nd rock classes, and lower for the lower rock classes. Furthermore, factor of safety is higher when $K_0=0.5$ compared to that in case of $K_0=2.0$. Through this research, it is found that the factor of safety defined in this research can be used as a good quantitative index representing the stability of tunnels. Also, close examination of the results can help adjustment of the quantity and location of additional supports.

KeyWords Tunnel, Factor of safety, Strength reduction technique, Tunnel support, Rock class

초 록 본 연구에서는 터널의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 지반과 지보재의 파괴를 고려한 터널의 안전율에 대한 개념을 정립하고, 안전율을 계산하는 수치해석기법을 정립하고자 하였다. 안전율을 구하기 위해서 지반이 파괴될 때까지 지반의 강도를 감소시켜가며 반복적으로 해석을 수행하는 전단강도 감소기법을 사용하여 지반의 파괴 및 이에 따른 지보재의 파괴를 고려하여 축압계수 및 암반등급에 따른 터널의 안전율을 구하였다. 이 방법을 사용하면 파괴 활동면을 미리 가정하지 않아도 안전율과 파괴 활동면을 동시에 구할 수 있다. 수치해석은 유한 차분법에 기초를 둔 지반해석 프로그램인 FLAC^{2D}(ver 3.3)을 사용하였으며, 해석 결과로부터 소성영역의 분포와 지보재의 응력분포를 확인하였다. 해석 결과 양호한 1등급과 2등급의 암반에서는 안전율이 높게 나타났으며, 암반등급이 저하될수록 안전율은 낮게 계산되었다. 또한 축압계수 0.5인 경우가 축압계수 2.0인 경우보다 안전율이 더 크게 확보되는 것으로 나타났다. 본 연구에서 정의된 안전율은 터널의 안정성을 나타내는 정량적 지표로 사용될 수 있음을 확인하였으며, 소성영역, 슛크리트 응력, 록볼트 축력을 검토함으로써 터널에 설치되는 지보재의 양과 설치 위치를 조정하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 터널, 안전율, 전단강도 감소기법, 터널 지보재, 암반등급

1. 서 론

사면의 경우 대표적인 파괴양상들이 있으며 파괴면의 형상을 사전에 가정할 수가 있다. 하지만 터널의 경우는 사면의 경우와는 달리 파괴면의 형상을 사전에 가

정하기 어려워 한계평형기법에 기초한 해석법 등을 적용하여 안전율을 구하기가 곤란하다(유광호, 2000). 이러한 이유에서 터널을 대상으로 한 수치해석은 안전율을 구하기보다는 설계 검증을 위한 안정성 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

¹⁾ 태조 엔지니어링

²⁾ 수원대학교 토목공학과 교수

³⁾ 한국도로공사 수석연구원

*교신저자(Corresponding Author): yjpark@suwon.ac.kr

접수일: 2004년 9월 11일

심사 완료일: 2004년 10월 15일

않아도 안전율과 파괴 활동면을 동시에 구할 수 있는 장점이 있다. 터널의 주된 지보재인 슛크리트와 록볼트는 터널의 내공변위를 억제하고 소성영역의 발생을 방지하는 역할을 하는데, 극한하중을 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 터널의 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 지반강도와와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 지반의 실제 강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다(Duncan, 1996). 사면의 경우 전단강도 감소기법은 실제 중력을 가한 상태에서 지반의 강도를 감소시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 강도비로서 안전율을 구한다. 이러한 원리는 보강되지 않은 사면이나 보강된 사면에 모두 적용될 수 있다(박연준 외 3명, 1999).

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.

한편 Fig. 1에서와 같이 수치해석에 있어, 각요소의 응력상태는 주응력 σ_1 과 σ_3 에 의해 표현될 수 있다. 일반적으로 이 응력 상태는 $\sigma - \tau$ 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원 (a)으로 그려진다. 이 원이 파괴면에 접하게 될 때 파괴가 발생하게 된다.

원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 파괴가 발생하

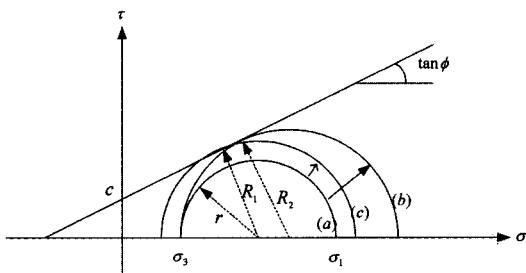


Fig. 1. Calculation of local factor of safety (You, et al., 2000)

려면 σ_3 는 그대로 유지하면서 원 (b)과 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다. 또는, 원 (a)에 의해 표현된 응력 상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원 (c)과 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/응력비에 해당된다. 이는 해당 요소가 파괴에 근접한 정도를 나타내는 척도가 되며, 종종 국부안전율(local factor of safety)이라고도 일컬어진다. 터널의 경우 터널 주변 지반에 국부적인 파괴가 발생한다 하더라도 지보재가 지지해주므로 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 외 2명(2000)은 연약암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가에서 전단강도 감소기법을 사용하여 터널의 안전율을 구하는 기법을 제시하였다.

터널안전해석에서 전단강도 감소기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 를 시험안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다(Dawon, et al., 1999). 이때 시험 안전율(trial factor of safety)과 이에 의해 감소된 지반의 물성은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 원래의 물성을 선형적으로 감소시킨 것이며 원래의 물성과 다음의 관계를 갖는다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \tag{1}$$

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

이 시험 안전율에 의해 감소된 지반의 물성을 가진

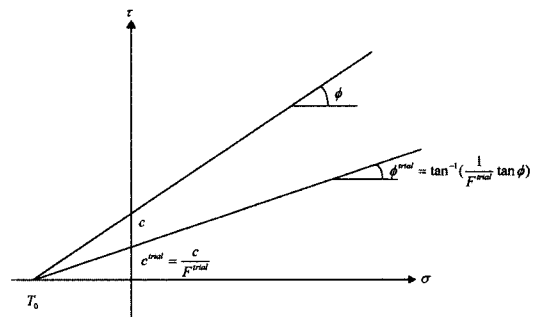


Fig. 2. Shear strength and trial shear strength (Park and You, 1998)

암반에 터널을 굴착하였더니 파괴가 발생하였다면, 터널의 안전율은 방금 적용되었던 시험 안전율보다는 작을 것이며, 파괴가 발생하지 않았다면 시험안전율보다는 클 것이다. 따라서 터널의 파괴가 발생되기 시작하는 시점의 시험안전율을 구하면, 이것이 곧 터널의 안전율이 된다고 할 수 있다.

2.3 전단강도 감소기법에 의한 터널의 안전율 계산Routine

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 정해지는데, 해석과정에서 단계별로 감소시킬 수 있다.

해석결과가 수렴되고 지보재에 작용하는 응력이 허용 응력을 초과하지 않으면 터널의 파괴가 발생하지 않은 것이므로 시험안전율(F^{trial})은 증분값 만큼 증가되고, 이

때 시험안전율은 F^{low} 로 저장된다. 이러한 상태로 시험 안전율을 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 1.0 간격으로 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 1.0사이의 값을 가지게 되므로 1.0에서부터 0.2 간격으로 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 수행한다. 다시 1.2에서 해석 결과가 수렴하지 않으면, 실제 안전율은 1.0에서 1.2사이에 존재하므로 1.0에서부터 0.02 간격으로 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 외, 2000). Fig. 3은 이러한 방법으로 안전율을 구하는 해석과정을 나타내는 흐름도이다.

3. 해석조건 및 방법

Fig. 4는 터널 해석을 위한 지반 모델의 개요를 보여주는데, 계산상의 편의를 위해 좌우대칭 조건을 가정하여 반단면 해석을 수행하였다. 터널 주변에 미칠 수 있는 영향을 고려하여 터널 상부 지반의 깊이를 터널 높이의 5배 이상, 좌·우측 경계를 터널 폭의 3배 이상으로 하였다. 모델의 좌·우측 경계는 X-방향(수평방향) 변위를 구속하고, 모델의 하부 경계는 Y-방향(수직방

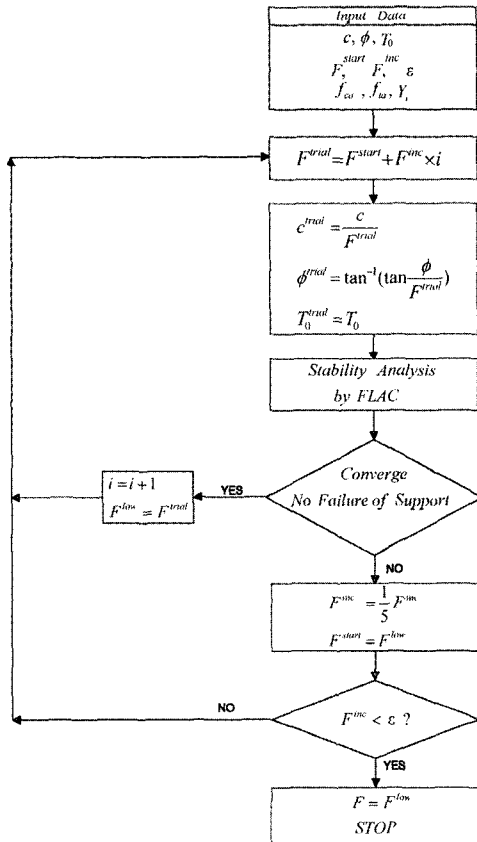


Fig. 3. Flow chart for the calculation of safety factor (You, et al., 2000)

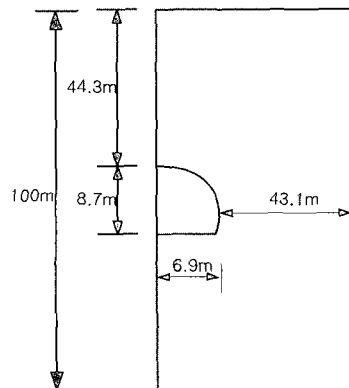


Fig. 4. Geometry of 2-lane tunnel

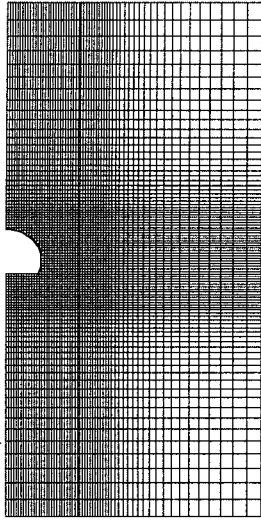


Fig. 5. Mesh for stability analysis

향) 변위를 구속하였다. 암반등급 5등급의 경우 강관다단 그라우팅 후 전단면 굴착을 하였고, 암반등급 6등급의 경우 상하단면 분할굴착을 하였다. 강관다단 그라우팅 시 상부 3 m, 측벽부 3 m의 강관다단 그라우팅을 적용하여 지반보강 효과를 주었다. 요소의 폭과 높이는 1 m를 기준으로 하였고, 해석의 정확성을 높이기 위하여 터널 부근의 요소는 한 변의 길이가 0.5 m 내외가 되도록 더 조밀하게 하였다. 총 요소의 수는 전단면굴착과 상·하단면 분할굴착의 경우 모두 61×91이다. Fig. 5는 본 연구에 사용된 해석 요소망을 도시한 것이다. 굴착 방법 및 보강 여부에 따라 약간씩 다른 형태의 요소망이 사용되었다.

3.1 지보재의 물성

지보재인 슛크리트와 록볼트 및 격자지보공은 암반등

급별로 Table 1의 내용과 같이 타설하였다. 본 연구에서는 평면변형을 조건을 적용한 2차원 해석을 수행하였으므로, 터널 막장 후방의 미굴착 지반에 의한 종방향 아치효과를 고려해야 한다. 종방향 아치효과를 고려하기 위해 지보패턴도를 참고하여, 종방향 단위길이 1 m를 기준으로 한 지보재의 강도 정수를 계산하였다.

가. 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(한국도로공사 도로연구소, 2001). 이러한 사항을 고려하여 SFRS의 f_{ck} 를 일반 슛크리트의 재령 28일 압축강도인 210 kgf/cm^2 의 50%를 증가시킨 315 kgf/cm^2 로 가정하였다. 이 값을 이용하여 SFRS의 허용응력을 계산하면 다음과 같다.

압축연단에서의 허용압축응력:

$$f_{ca} = 0.4 f_{ck} (\text{kgf/cm}^2) = 126 \text{ kgf/cm}^2 \quad (3)$$

인장연단에서의 허용인장응력:

$$f_{ta} = 0.51 \sqrt{f_{ck}} (\text{kgf/cm}^2) = 9.1 \text{ kgf/cm}^2 \quad (4)$$

해석에 사용된 슛크리트 탄성계수는 Table. 2와 같이 시공 후의 재령을 고려하여 연성(soft) 및 경성(hard) 슛크리트로 나누어 적용하였다.

Table 2. Properties of shotcrete

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Soft shotcrete	5.0	0.2
Hard shotcrete	10.0	0.2

Table 1. Excavation and support design

Rock mass class		I	II	III	IV	V	VI
Excavation method		Full face	Full face	Full face	Full face	Full face	Bench cut
Shotcrete thickness, cm (SFRS)	1 st	5	5	5	5	5	5
	2 nd	5 (Plain)	8	8	10	10	10
	3 rd	-	-	-	-	-	6
Rock blok	Length, m	4	4	5	5	5	5
	Longitudinal-spacing, m	2	1.5	1	1	0.5	0.5
	Section-spacing, m	1.5	1.5	1	1	1	1
Lattice girder spacing, m		-	1.5	1	0.5	0.5	0.5

나. 록볼트 제원 및 물성

록볼트의 직경은 2.5 cm, 길이는 1등급, 2등급의 경우 4 m, 3등급~6등급의 경우 5 m를 사용하였다. 초기 인장은 가하지 않는 것으로 가정하였으며, 인발내력은 10 tonf으로 하였다. 2차원 해석시에는 지보재의 중방향 설치 간격을 고려하여 강도정수를 조절하여 사용하였다.

3.2 해석방법

터널의 굴착방법은 Table 3에 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 3 m, 측벽부에서 3 m의 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.

터널 지보재의 설계에 있어서 중요한 문제는 지보재를 설치하기 이전에 발생하는 지반 이완 또는 지반응력의 해방(relaxation)량이다(정대열, 1993). 만약 모델에서 해방이 전혀 허용되지 않는다면, 지보재에 작용하는 하중은 과대 평가될 것이다. 왜냐하면 일부의 해방은

굴착 전에도 일어나기 때문이다. 만약 지보재 설치 이전에 완전한 해방이 허용된다면, 지보재에 작용하는 하중은 0이 될 것이다. 이와 같은 상태라면, 지보재가 설치되지 않아도 평형상태가 얻어질 수 있다.

이러한 문제는 적절한 하중분배율을 적용하므로써 해결될 수 있다. 암반등급별로 굴착 및 지보재 설치 방법이 다르므로 하중분배율 또한 달리 적용되었다.

본 연구에서는 굴착 후 지보재 설치 이전에 암반 하중의 60%가 해방된다고 가정하였다. 암반등급에 따라 1, 2, 3차로 나누어 슛크리트가 시공되는 단계에서의 하중분배율은 Table 4에 나타난 바와 같다. 상·하단면 분할 굴착을 하는 6등급 암반의 경우 상반굴착과 하반 굴착 시 동일한 하중 분배율이 적용되었다.

4. 대상터널의 안정성 해석

4.1 소성영역

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

축압계수가 2.0일 경우에는 터널 천단(crown)상부와 바닥부(invert)에 소성영역이 발생하였다. 암반등급이 저하될수록 그 규모가 크며, 천단부와 바닥부에는 활동

Table 3. Excavation and supporting method for different rock class

Class I	Class II	Class III	Class IV	Class V	Class VI
full face	full face	full face	full face	pipe roof+ full face	pipe roof+ bench cut+ invert

Table 4. Load relaxation factors used at different construction stages

Excavation step	I	II	III	IV	V	VI
Face excavation	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
1 st shotcrete (soft)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7
1 st shotcrete (hard)+ rock bolt+ 2 nd shotcrete (soft) (hard+soft)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8
2 nd shotcrete (hard)+ 3 rd shotcrete (soft) (hard+hard)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
Final (all hard)	-	-	-	-	-	hard+hard+soft
						0.9
						hard+hard+hard
						1.0

성 전단파괴영역도 부분적으로 발달하고 있다. 축압계수가 0.5일 경우에는 수평응력 보다 큰 연직응력의 영향으로 측벽부에 응력 집중이 발생하여, 이에 따라 측벽부에서 파괴가 발생하며, 축압 계수가 2.0일 경우에는 연직응력 보다 큰 수평응력의 영향으로 터널 천단부와 바닥부에 응력집중이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 지보재의 응력분포

Fig. 6은 터널의 주요 지보재인 슛크리트와 록볼트에 작용하는 응력을 도시한 것이다. 이 그림들의 수평축은 터널 천단부(I)-측벽부(II)-바닥부(III, 6등급에만 있음)를 연결한 터널의 내부 경계를 펼쳐놓은 것이다.

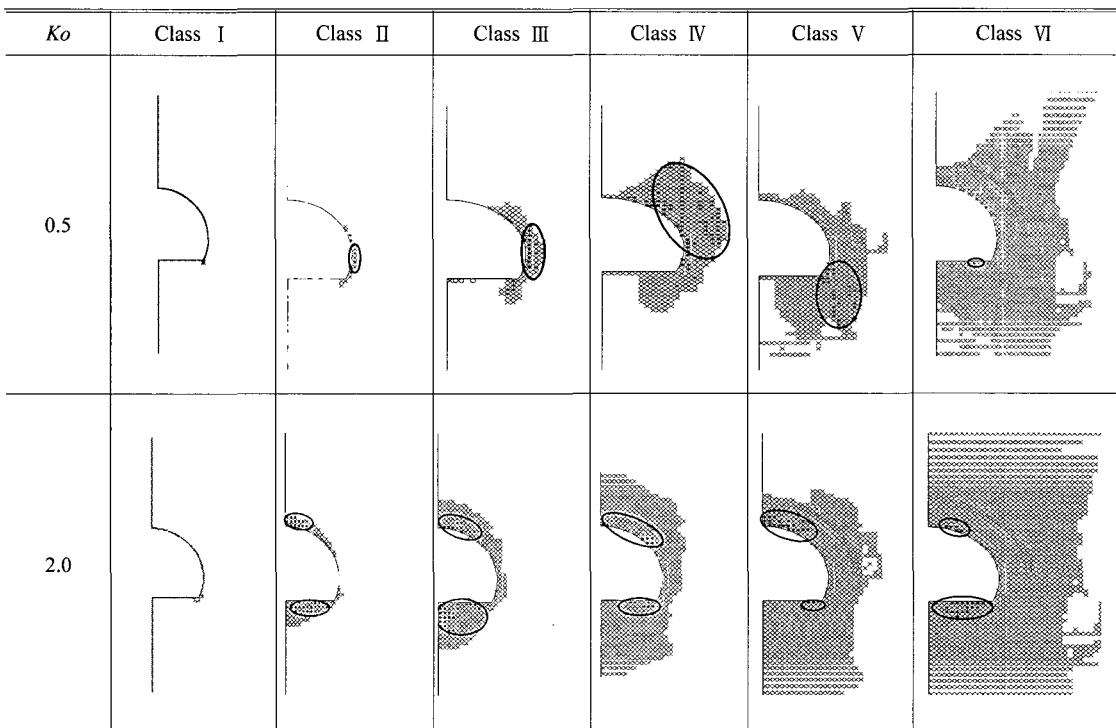
스틁크리트 응력의 경우, 슛크리트에 작용하는 응력 중 최대값을 도시한 것이며(+, 압축), 록볼트 축력은 한 개의 록볼트 내에 작용하는 축력 중 최대값을 도시한 것이다.

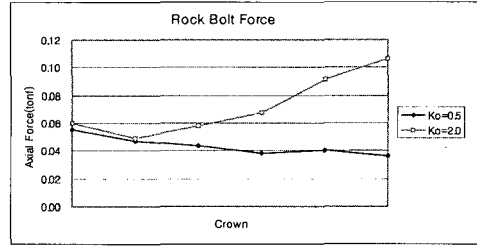
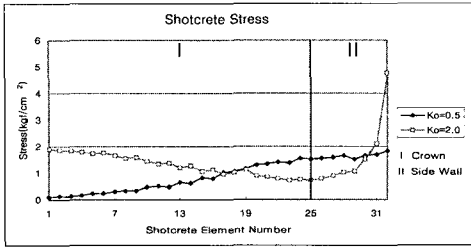
스틁크리트 응력에 대한 축압 계수의 영향을 살펴보면, 축압계수가 0.5인 경우에는 6등급을 제외하고는 모두 응력집중이 발생하는 측벽부에서 높은 값을 나타내고 있다. 6등급 암반의 경우에는 천단부와 측벽의 경계부 및 바닥부에서 높은 값을 보였다. 반면 축압 계수가 2.0

인 경우에는 대체로 천단부에서 높은 값을 보이나, 암질이 양호하여 소성 영역이 거의 발생하지 않는 1등급 및 2등급에서는 측벽 하단에서 상대적으로 커다란 응력이 발생함을 알 수 있다. 하지만 그 크기는 10 kgf/cm^2 미만으로 매우 작은 값이다. 슛크리트에 작용하는 응력은 모두 허용 응력인 126 kgf/cm^2 이내이며, 따라서 슛크리트의 파괴는 발생하지 않았다.

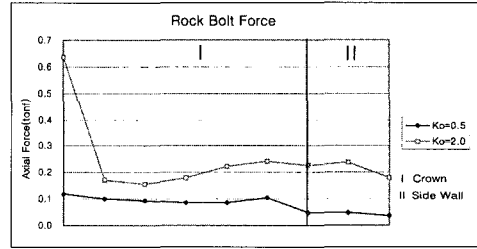
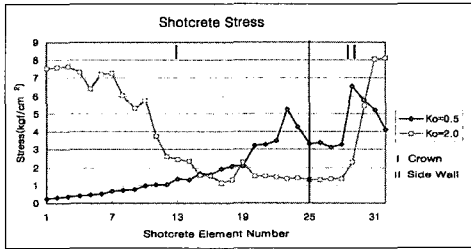
록볼트에 작용하는 최대 하중은 록볼트의 종간격을 1 m인 경우로 환산하여 도시한 것이다. 예를 들면 6등급 암반에 설치된 록볼트의 경우, 종간격이 0.5 m 이므로 해석 결과를 1 m 간격으로 환산하려면 결과 값을 2로 나누어야 하며, 1등급 암반의 경우에는 설치 간격이 2 m 이므로 해석 결과에 2를 곱하여야 한다. 그래프에 도시된 값들은 이러한 환산 과정을 거친 값이다. 록볼트에 작용하는 최대 하중의 분포 경향은 소성 영역의 발달과 깊은 관계가 있다. Table 5의 소성영역 분포와 록볼트 최대축력의 위치는 대체로 일치하고 있음을 알 수 있다. 6등급 암반에서, 특히 축압계수가 2.0인 경우, 록볼트에 작용하는 최대 축력은 극한값에 도달하고 있어 록볼트의 길이를 늘리거나, 설치 간격을 줄일 필요성이 있음을 알 수 있다.

Table 5. Plasticity regions for difference rock mass and stress conditions

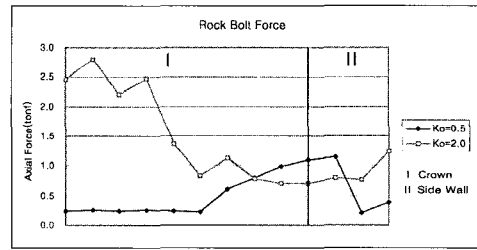
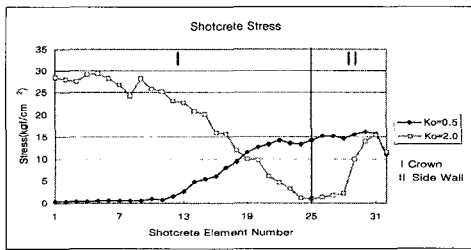




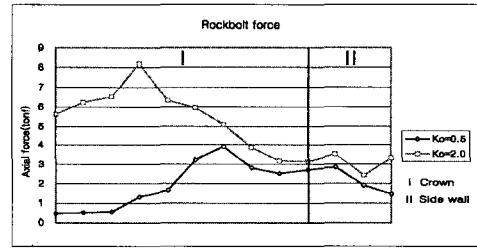
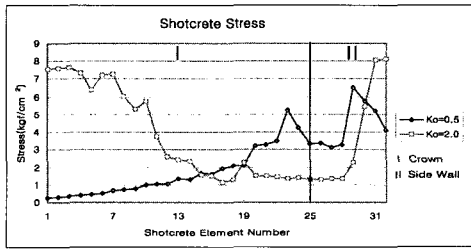
(a) Rock mass class I



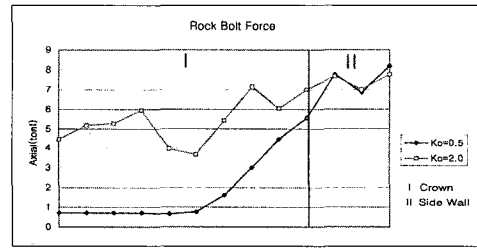
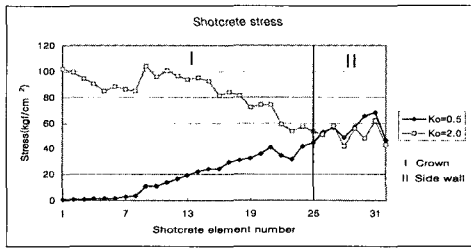
(b) Rock mass class II



(c) Rock mass class III

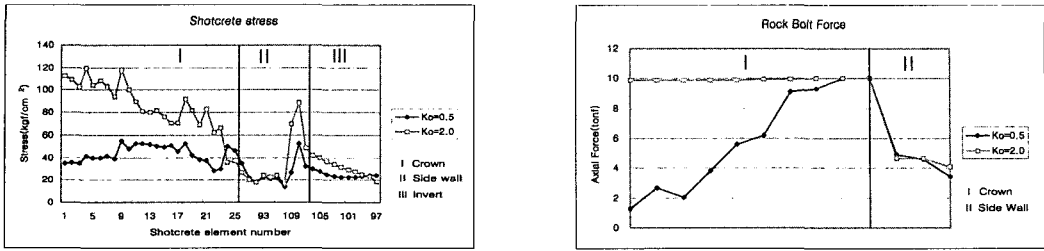


(d) Rock mass class IV



(e) Rock mass class V

Fig. 6. Shotcrete stress and maximum rock bolt force along the tunnel boundary



(f) Rock mass class VI

Fig. 6. (Continued)

4.3 해석 결과 요약

축압계수 및 암반등급별로 해석을 수행한 결과를 조성영역, 지보재의 응력분포를 중심으로 요약하면 다음의 Table 6과 같다.

5. 안전율의 계산

5.1 축압계수 및 암반등급별 안전율

터널에 대하여 전단강도 감소기법을 적용하여 지반의 파괴 및 이에 따른 지보재의 파괴를 고려하여 안전율을 구하였다. 숏크리트의 경우 허용압축응력 f_{ca} 는 126 kgf/cm^2 , 허용인장응력 f_{ta} 는 9.1 kgf/cm^2 을 적용하여, 이 허용응력을 초과하는 경우에는 숏크리트가 파괴된 것으로 판별하였고, 록볼트의 경우 인발내력 10 tonf을 초과하는 경우에 파괴된다고 판단하였다.

본 연구에 사용된 전단강도 감소기법의 특성상 지반의 강도가 높은 1등급과 2등급의 암반에서는 안전율이 높게 나오며 암반등급이 저하될수록 안전율은 낮게 계산되었다. 또한 일반적으로 축압계수 0.5인 경우가 축압계수 2.0인 경우보다 안전율이 더 크게 확보되는 것으로 나타났다. Table 7은 축압계수 및 암반등급에 따른 터널의 안전율을 보여주고 있다.

Table 7. Safety factor of a 2-lane tunnel at different rock class and stress conditions

Rock mass class	I	II	III	IV	V	VI
$K_0=0.5$	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

Table 6. Summary of the result for current design

Rock mass class	K_0	High shotcrete stress occurs at	High rock bolt force occurs at	Plasticity region occurs at
I	0.5	side wall	crown	-
	2.0	crown	lower crown and upper side wall	-
II	0.5	side wall	crown	side wall
	2.0	crown	crown	crown and flood
III	0.5	side wall	side wall	side wall
	2.0	crown	crown	crown and flood
IV	0.5	side wall	lower crown and upper side wall	crown and floor
	2.0	crown	crown	crown and flood
V	0.5	side wall	side wall	side wall and floor
	2.0	crown	side wall	all around tunnel boundary
VI	0.5	lower crown, upper side wall and invert	lower crown and upper side wall	all around tunnel boundary
	2.0	crown and invert	crown	all around tunnel boundary

5.2 축압계수 및 암반등급에 따른 소성영역

본 연구에 사용된 전단강도 감소기법의 특성상 해당 안전율에 의해 전단강도가 감소된 경우의 소성영역은 암질이 양호할수록 그 규모가 크게 발생하였다.

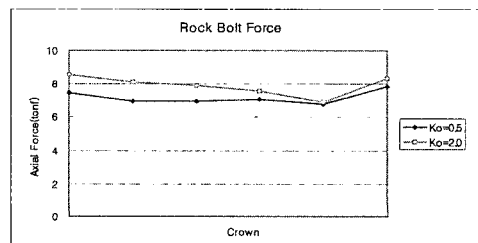
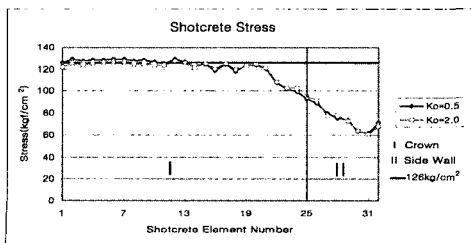
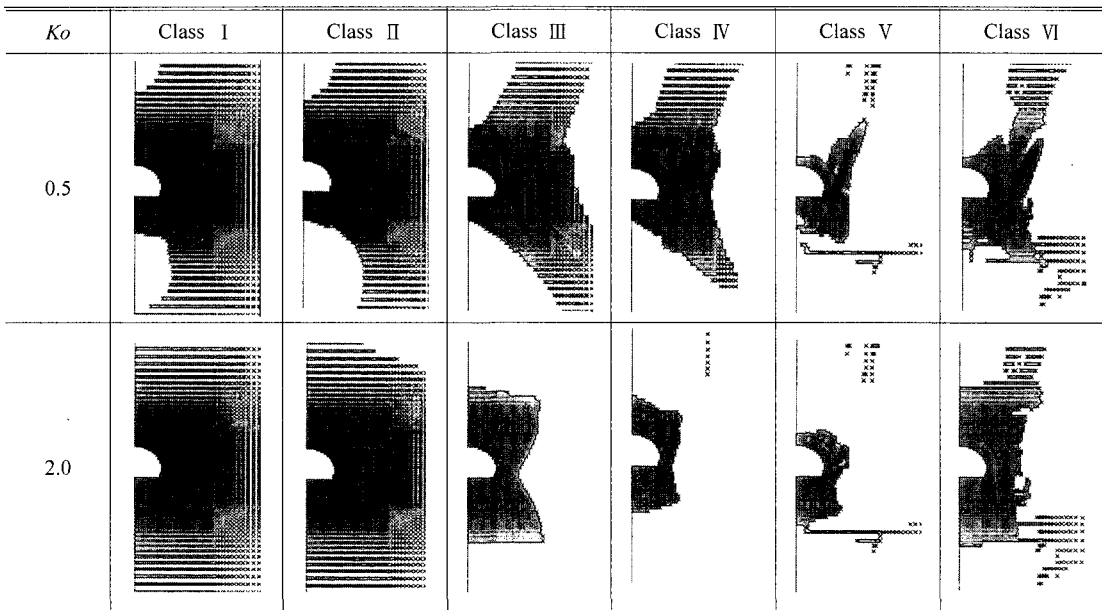
Table 8은 축압계수별-암반등급별 소성영역 변화도를 보여 주고 있다. Table 8에서 알 수 있듯이, 축압계수가 0.5인 경우 터널 주위 전반에 걸쳐서 광범위하게 발생하였으나, 터널의 상부 지반과 하부 지반에서는 그 규모가 작게 발생하였고, 천단부에서 지반의 우측 상부 지반으로 올라가면서 발달하고, 측벽부와 바다부에서 우측 하부지반으로 내려가면서 발달하였다. 활동성 전단 파괴영역은 5등급 암반과 6등급 암반을 제외한 암반 등급에서는 터널 주변 전반에 걸쳐 그 규모가 크게 발생하였고, 5등급 암반과 6등급 암반의 경우는 측벽부에서 우측 상부지반으로 올라가면서 발달하였다.

또한 축압계수가 2.0일 경우에도 터널 주위 전반에 걸쳐서 광범위하게 발생하였으나, 측벽부에는 그 규모가 작게 발생하였고, 천단부 상부의 지반과 바다부 하부의 지반에 그 규모가 크게 발달하였다. 활동성 전단 파괴영역은 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

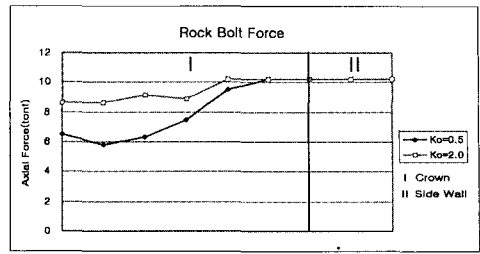
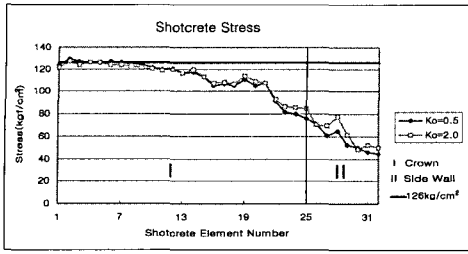
Fig. 7은 축압계수 및 암반등급에 따른 지보재의 응력 분포 및 파괴영역을 도시한 것이다. 지반의 파괴에 따른 소성영역과 활동성 전단 파괴영역의 발생으로 인하여, 지보재는 극한하중을 초과하는 힘을 받게 되어 파괴되었다.

Table 8. Plastic regions at critical strength

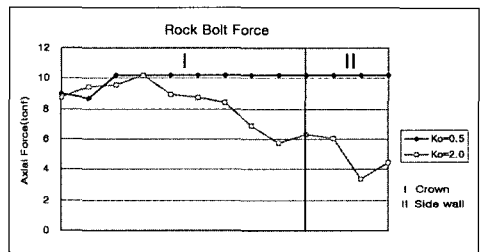
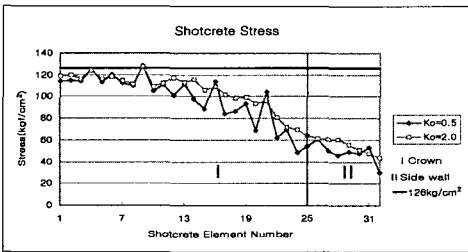


(a) Rock mass class I

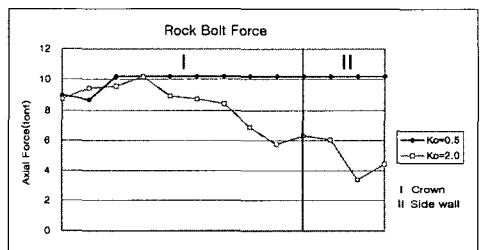
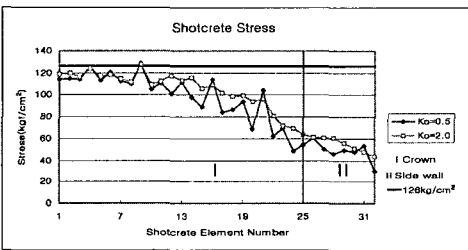
Fig. 7. Shotcrete stress and maximum rock bolt force along the tunnel boundary



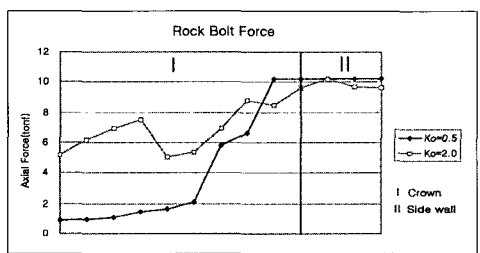
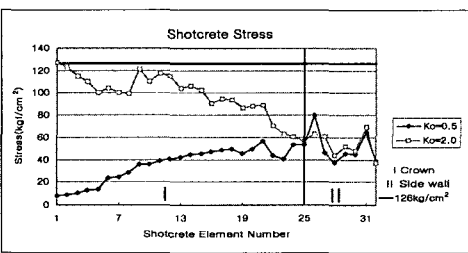
(b) Rock mass class II



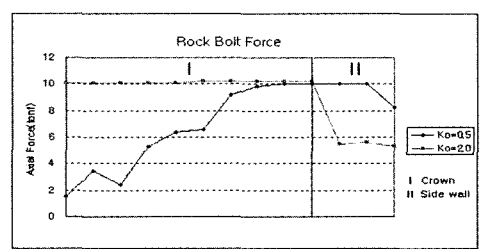
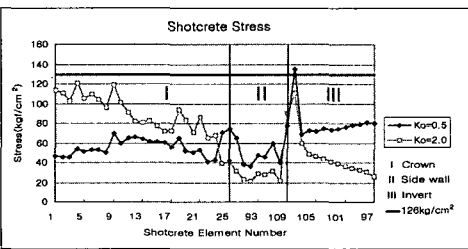
(c) Rock mass class III



(d) Rock mass class IV



(e) Rock mass class V



(f) Rock mass class VI

Fig. 7. (Continued)

5.4 해석 결과 요약

측압계수 및 암반등급별로 해석을 수행한 결과를 소성영역, 지보재의 파괴영역을 중심으로 요약하면 다음의 Table 9와 같다.

6. 결 론

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

- 1) 지반의 파괴 및 지보재의 파괴를 고려한 터널에 대한 안전율의 개념이 터널 전체의 안정성을 나타내는 지표로 사용될 수 있음을 알았다.
- 2) 안전율은 측압계수가 0.5인 경우가 측압계수 2.0인 경우보다 높게 나타났으며, 암질이 양호할수록 높게 계산되었다.
- 3) 소성영역의 발생 위치는 측압계수에 따라 변화하였는데, 측압계수가 0.5인 경우에는 측벽부에서 발달하였고, 측압계수가 2.0인 경우에는 천단부와 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) 대상터널의 안정성 해석 시 지보재는 극한하중보다

작은 힘을 받고 있어서 파괴되지 않았지만, 암질이 가장 불량한 6등급 암반의 경우 록볼트의 최대 축력은 극한값에 도달하고 있어 록볼트 설치 간격을 줄이거나 길이를 늘여야 할 필요성이 있었다.

- 6) 지보재 파괴 발생 시점에서의 해석결과를 살펴보면, 지반의 파괴에 따른 소성영역과 활동성 전단 파괴영역의 발생으로 인하여 지보재는 극한하중보다 큰 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. 암반등급별 안전율로부터 지보재 설치량의 과다를 판별하여, 안전율이 높은 암반등급에서의 터널 굴착 시는 경제성 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.

사 사

본 연구는 과학기술부가 선정하 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC:생산기반 분야/ERC)의 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

Table 9. Summary of the result at critical strength

Rock mass class	K ₀	Failure zone of shotcrete	Failure zone of rock	Plasticity region occurs at
1	0.5	compressive failure at crown	-	all around tunnel boundary
	2.0	compressive failure at crown	-	all around tunnel boundary
2	0.5	compressive failure at crown	side wall	all around tunnel boundary
	2.0	compressive failure at crown	side wall	all around tunnel boundary
3	0.5	compressive failure at crown	side wall	all around tunnel boundary
	2.0	compressive failure at crown	crown	all around tunnel boundary
4	0.5	compressive failure at crown	all around tunnel boundary	all around tunnel boundary
	2.0	compressive failure at crown	crown	all around tunnel boundary
5	0.5	tensile failure at side wall	side wall	side wall and floor
	2.0	compressive failure at crown	side wall	all around tunnel boundary
6	0.5	compressive failure at invert and lower side wall boundary	side wall	all around tunnel boundary
	2.0	compressive failure at invert and lower side wall boundary	crown	all around tunnel boundary

참고문헌

1. 박연준, 유광호, 1998, 편재 절리모형을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 8.4, 287-295.
2. 유광호, 박연준, 배규진, 2000, 연약 암반층에 굴착된 터널의 안전을평가, 터널기술, 2.3, 47-57.
3. 유광호, 2000, 토목기술자를 위한 암반공학, 한국지반공학회, 지반공학시리즈11, 구미서관, 413-458.
4. 정대열, 1993, 터널 막장 주위의 3차원 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
5. 박연준, 채영수, 유광호, 백영식, 1999, 절편법과 유한차분법에 의한 사면안정해석 비교연구, 한국지반공학회 논문집 15.6, 263-272.
6. 한국도로공사 도로 연구소, 2001, 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준정립II.
7. Dawson, E. M. & W. H. Roth, and A. Drescher, 1998, Slope Stability Analysis by strength reduction, Geotechnique, 49.6, 835-840.
8. Duncan, J. M, 1996, State of the Art Limit Equilibrium and Finite-element Analysis of Slopes, J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. 122.3 577-596.

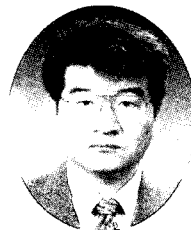
박종원



2002년 수원대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2004년 수원대학교 공과대학 토목공학과
공학석사

Tel: 041-545-4352
E-mail: pjw021@hanmail.net
사원현재 태조 엔지니어링

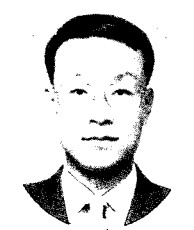
박연준



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사

1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원
토목공학과 공학박사
Tel: 031-220-2580
E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수

유광호



1984년 연세대학교 공과대학 토목공학과
공학사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학석사

1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원
토목공학과 공학박사
Tel: 031-220-2566
E-mail: khyou@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수

이상돈



1988년 서울대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1990년 서울대학교 대학원
자원공학과 공학석사
1996년 서울대학교 대학원
자원공학과 공학박사

Tel: 031-371-3370
E-mail: sdlee@freeway.co.kr
현재 한국도로공사 도로교통기술원
지반연구그룹 수석연구원