

## 터널의 안전을 평가 시 지보재 파괴 고려 방안 연구

### A Methodology of Considering the Failure of Supports in Evaluating Tunnel Safety Factors

유광호<sup>1)</sup>, You, Kwang-Ho, 홍근영<sup>\*2)</sup>, Hong, Keun-Young, 박연준<sup>3)</sup>, Park, Yeon-Jun, 이현구<sup>4)</sup>, Lee, Hyun-Koo, 김재권<sup>5)</sup>, Kim, Jea-Kwon

<sup>1)</sup> 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

<sup>\*2)</sup> 정회원, (주)삼보기술단 지반부 기사

<sup>3)</sup> 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

<sup>4)</sup> 정회원, 삼성건설(주) 토목사업본부 차장

<sup>5)</sup> 정회원, 삼성건설(주) 토목사업본부 상무

**SYNOPSIS** : The safety factor of a tunnel considering the failure of supports is important because the failure of supports might cause the collapse of the tunnel. In the previous studies, shotcrete was modelled as beam elements and the failure of the shotcrete was checked according to the allowable working stress concept. In this study, shotcrete was modelled by both beam elements and continuum (elasto-plastic) elements. Safety factors of tunnels were estimated by two dimensional numerical analysis with varying rock mass class, coefficient of lateral pressure, thickness of shotcrete, rock bolt reinforcement and excavation method. Also the study suggested not only a proper amount of supports but also modelling method.

**Key words** : Safety factor of tunnel, supports, rock mass class, coefficient of lateral pressure

## 1. 서 론

터널의 경우 사면과는 달리 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 한계평형법에 기초한 해석법을 적용하여 안전율을 구하기가 곤란하다. 이러한 이유에서 터널을 대상으로 한 수치해석은 안전율을 구하기보다는 안정성을 평가하는 데만 제한적으로 사용되어 왔다 (유광호 등, 2000). 본 연구에 사용된 전단강도 감소기법은 Dawson et al.(1999)에 의해 개발되었으며, 전단강도 감소기법은 실제 중력을 가한 상태에서 지반의 강도를 감소시켜가며 해석을 수행하고 터널이 파괴될 때의 강도비로서 안전율을 구하는 방법이다 (유광호 등, 2001; 박연준 등, 2004). 전단강도 감소기법은 파괴활동면을 미리 가정하지 않고, 해석결과로서 안전율과 파괴활동면이 동시에 구해지는 장점이 있다.

터널의 안전율은 지반조건에 따라 파괴면의 형상이 바뀔 수 있기 때문에 예상 파괴면을 사전에 가정하기가 어렵다. 또한 지반의 파괴뿐만 아니라 지보재의 파괴도 터널의 안정성에 큰 영향을 미치므로 터널의 안전율을 구함에 있어 지보재의 파괴도 고려되어야 한다.

지보재의 파괴를 고려한 터널의 안전율을 구하는 방법으로 슛크리트 내에 발생하는 응력이 허용응력을 초과하면 슛크리트가 파괴된다고 가정하는 허용응력설계법을 이용하여 지반과 슛크리트의 파괴를 고려하여 안전율을 구하는 방법이 유광호 등(2000)에 의해 제시된 바 있다. 하지만, 이 방법은 지반의 파괴와 지보재의 파괴를 별개로 판단하기 때문에, 슛크리트에 응력집중이 발생하는 경우 터널의 안전율이

비현실적으로 매우 작게 산정되는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 터널의 안전율을 구함에 있어, 슛크리트의 파괴를 보다 현실적으로 고려할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 슛크리트를 지반과 같이 탄소성요소로 모델링하고, 허용응력 설계법에 의해 슛크리트의 파괴를 고려하여 안전율을 구하는 기존의 방법과 비교하였다.

## 2. 2차원 수치해석

### 2.1 수치 모델링

Fig. 1은 2차원 해석에 사용된 터널형상 및 지반 모델을 보여준다. 폭 10m 높이 8m의 마제형 터널이며 측면 및 하부경계는 터널 굴착 시 발생하는 굴착상당외력을 감안하여 터널주변으로부터 터널직경의 4배 이상을 고려하여 높이 90m 폭 90m의 해석영역을 선정하였다. 터널주변은 1m×1m의 요소를 사용하였으며 터널로부터 멀어질수록 요소의 크기를 늘려 해석시간을 줄였다. 2차원 해석에 사용된 요소망수는 60개×60개이며 전체 요소의 좌·우 측면경계는 x방향(수평방향) 변위를 구속하고 하부경계는 y방향(수직방향)을 구속하여 경계조건을 설정하였다.

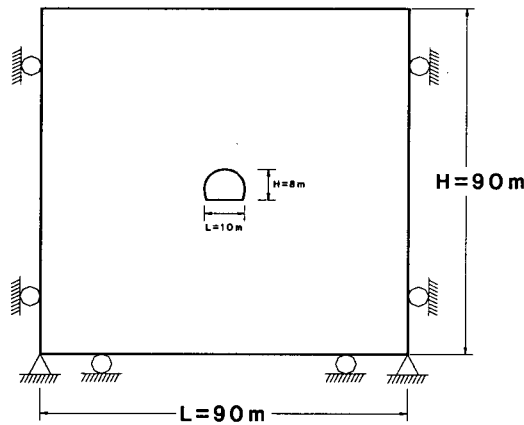
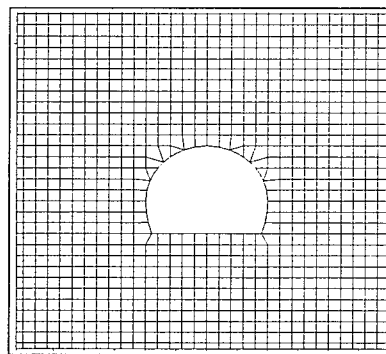
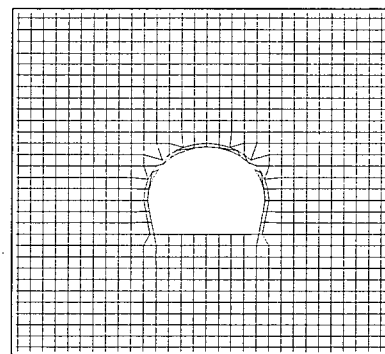


Fig. 1. Configuration for the analysis

수치해석에 있어서 해석 결과는 대상 지반, 굴착 및 지반의 거동, 슛크리트 및 록볼트 등의 지보재의 모델링 방법에 따라 많은 차이를 보일 수 있다. 따라서 지보재의 모델링에도 세심한 주의가 요구된다. 일반적으로 지보재는 다음과 같은 방법으로 모델링 된다. 첫 번째 방법은 Fig. 2의 (a)와 같이 보요소 혹은 봉(truss)요소와 같은 구조요소로 모델링하는 방법으로 가장 널리 적용되는 방법이다. 이 방법을 적용할 경우 지보 설계에 필요한 부재력이 자동적으로 계산되며, 절점 수 또한 증가하지 않는다는 이점이 있다.



(a) Beam (elastic) element



(b) Continuum (elasto-plastic) element

Fig. 2. Modeling method of supports

두 번째 방법은 Fig. 2의 (b) 같이 주변 지반과 같이 연속체요소로 모델링하는 방법으로 라이닝의 모델링에는 비교적 타당하다고 볼 수 있으나, 지보공의 경우 크기가 매우 작기 때문에 요소 및 절점의 수가 불필요하게 많아지고 지보공에 발생하는 축력 혹은 휨 모멘트 등은 해석 결과로부터 다시 계산하여야 한다는 번거로움이 있다. 세 번째 방법은 주변지반의 물성치를 향상시키는 방법으로 지반의 점착력 혹은 탄성계수를 개선시켜 지보효과를 대체하려는 것이다. 그러나 이러한 방법을 적용할 경우 개선시켜야 할 물성치의 정확한 설정이 매우 어려울 뿐만 아니라 지보의 부재력을 평가할 수 없다는 단점이 있다.

2차원 해석에서 슛크리트는 보요소와 연속체요소로 모델링하여 비교하였으며, 록볼트는 케이블(cable) 요소로 모델링하였다.

이상의 지보재를 모델링하는 방법 중 보요소로 가정할 경우 강도감소기법에 있어서 슛크리트는 해석 결과가 수렴하게 되더라도 파괴가 되는 지보재가 있는지를 판단하기 위하여 허용응력설계법 개념을 적용하여 터널이 불안정한 것으로 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 계산해야 하는 불편함이 있지만 지반과 같이 거동한다는 이점으로 안전을 계산 시 별도로 지보재의 파괴를 판단하지 않았다. 또한 록볼트의 파괴는 록볼트 제원에 따른 인발내력과 최대축력을 비교함으로써 파괴됨을 판단하였다.

2차원 해석은 Table 1과 같은 방법으로 지반등급을 1등급, 3등급, 5등급으로 구분하여 전단면 굴착과 상하분할 굴착에 대하여 해석을 수행하였으며, 축압계수를 0.5, 1.0, 2.0으로 구분하여 슛크리트 두께를 12cm, 20cm, 30cm로 나누어 해석을 수행하였다.

**Table 1. Excavation and support design**

Rock mass class			I		III		V	
K <sub>0</sub>	Excavation method		Full face	Bench cut	Full face	Bench cut	Full face	Bench cut
	0.5	Support method	Unsupported	○		○		○
Shotcrete(cm)			12/20/30		12/20/30		12/20/30	
1.0	Rock bolt	Length(m)	4		4		4	
		L/S* -spacing(m)	1/1		1/1		1/1	
2.0	Advanced excavation length(m)		3.5, 4.5, 5.5		2.0, 3.5, 4.5		1.2, 2.0, 3.0	
	Bench length(m)		35, 45, 55		20, 35, 45		12, 20, 30	

※ Longitudinal/Sectional

**Table 2. Deformation and strength modulus for rock classes**

(after Korea Highway Corporation, Highway & Transportation Institute, 2002)

Property	Young's modulus (GPa)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Friction angle (deg)	Cohesion (Pa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Tensile strength (Pa)
I	34.12	22.75	13.65	45	1e6	2600	5e5
III	13.01	8.67	5.20	38.5	2.5e5	2600	1.25e5
V	2.80	1.87	1.12	31	5e4	2600	2.5e4

## 2.2 입력 물성치

해석에 사용된 지반의 물성치는 한국도로공사에서 제시한 암반등급별 변형성 및 강도정수를 사용하였다(한국도로공사 도로교통기술원, 2002). 이 물성치는 기존의 설계자료와 Bieniawski가 RMR 값을 바탕으로 제안한 물성치를 참조하여 암반등급별 물성치를 가정한 것으로 그 중 1등급, 3등급, 5등급에 대하여 Table 2에 정리하였다.

해석에 고려된 지보재로는 강섬유보강 슛크리트(Steel fiber reinforced shotcrete, 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 슛크리트 재령 28일 압축강도인  $210 \text{ kg/cm}^2$ 의 50%를 증가시킨  $315 \text{ kg/cm}^2$ 로 가정하였다. 이 값을 이용하여 SFRS의 허용응력을 계산하면 다음과 같다.

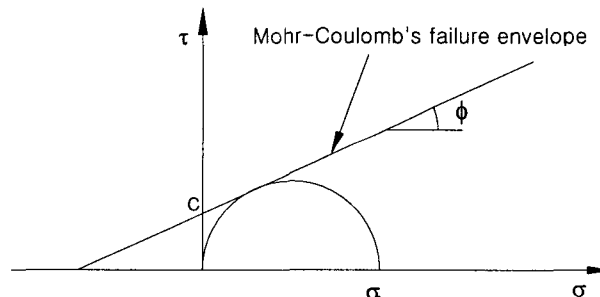
$$f_{ca} = 0.4 f_{ck} (\text{kg/cm}^2) = 126 \text{ kg/cm}^2 \quad (1)$$

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

**Table 3.** Input parameters for shotcrete

Beam(elastic) element								
Thickness(cm)		12cm	20cm	30cm				
Area(m <sup>2</sup> )		0.12	0.2	0.3				
Young's modulus(GPa)	Soft	5						
	Hard	15						
Sectional moment of inertia(m <sup>4</sup> )		1.44e-4	6.66e-4	2.25e-3				
Continuum(elasto-plastic) element								
Shotcrete	Property	Young's modulus (GPa)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Friction angle (deg)	Cohesion (MPa)	Density (kgf/m <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)
	Soft	5	2.78	2.08	35	6	2300	3
	Hard	15	8.33	6.25	35	6	2300	3

스�크리트를 연속체(탄소성)요소로 가정한 강섬유보강 슛크리트(SFRS)의 점착력 및 내부 마찰각의 값은 실험결과 및 기존 연구결과의 내용이 충분치 않으므로 본 연구에서는 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 적용하여 추정된 가정치를 사용하였다. 슛크리트의 일축압축강도  $\sigma_c$ 는  $235 \text{ kg/cm}^2$ 로 가정하였으며, 내부마찰각  $\phi$ 는  $35^\circ$ 로 가정하였다. Fig. 3의 Mohr-Coulomb의 파괴기준으로부터 파괴포락선을 직선으로 가정하여 구한 식 (3)을 사용하여 점착력을 구하였다. 보(beam)요소로 모델링할 경우와 연속체(탄소성)요소로 가정할 경우의 슛크리트의 입력 파라미터들을 Table 3에 정리하였다.



**Fig. 3.** Mohr-Coulomb's failure criterion

록볼트로 보강할 경우의 안전율을 비교하기 위하여 동일한 길이와 간격으로 해석을 수행하였다. 록볼트의 직경은 2.5cm, 길이는 4m로 하였다. 초기인장은 가하지 않는 것으로 가정하였으며, 인발내력은 10ton으로 하였다. 종방향 설치간격을 고려하여 Table 4에 정리하였다.

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

Table 4. Properties of rockbolt

Property Rock mass class	Longitudinal -spacing (m)	Area(m <sup>2</sup> )	Young's modulus (Gpa)	Tensile yield strength (N)	Bond stiffness (N/m/m)	Bond strength (N/m)
I	1	4.9e-4	210	1e5	5.5e8	1.5e5
III						
V						

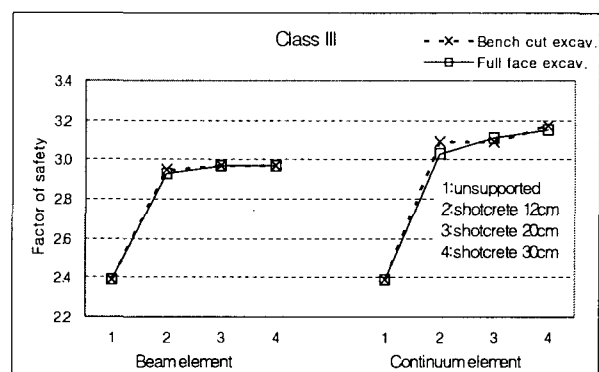
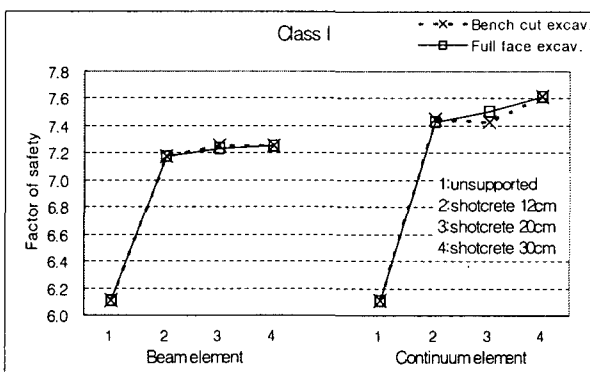
### 3. 해석결과

#### 3.1 터널의 예상 안전율

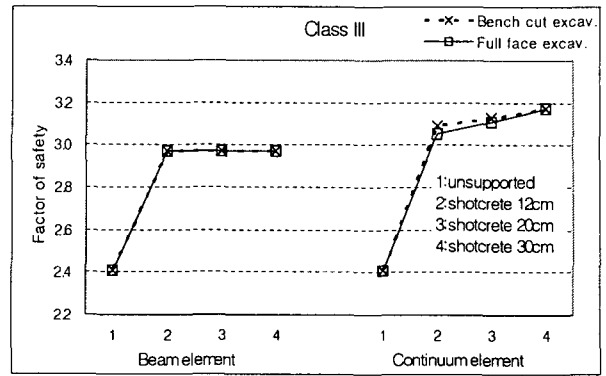
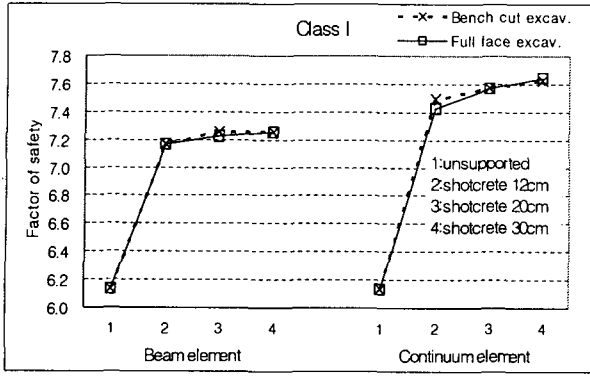
전단강도 감소기법을 이용하여 측압계수, 슛크리트 두께 및 굴착방법별로 암반등급에 따라 안전율을 구하여 비교하였으며, 주지보재인 슛크리트는 보요소와 연속체요소로 모델링하여 비교하였다.

보요소로 모델링하여 해석한 경우는 전단강도 감소기법에 의해 구한 안전율에서 지반과 지보재의 파괴를 고려하기 위해 지보재의 휨 응력을 구하여 지보재의 파괴를 고려하였다. 다만, 해석에 사용된 슛크리트는 강섬유보강 슛크리트로서 슛크리트의 허용압축응력  $f_{ca}$ 는 126 kg/cm<sup>2</sup>, 허용인장응력  $f_{ta}$ 는 9.1 kg/cm<sup>2</sup>을 적용하여, 허용응력을 초과할 경우에는 슛크리트가 파괴된 것으로 판별하였으며, 록볼트의 경우 인발내력 10 ton을 초과할 경우에 인발된다고 판별하였다(식(1), (2) 참조). 연속체(탄소성)요소로 모델링하여 해석한 경우는 지보재인 슛크리트를 탄소성체로 가정하였기 때문에 지반과 같이 파괴가 고려되었다. 다만 록볼트는 보요소와 같은 방법으로 파괴를 고려하였다.

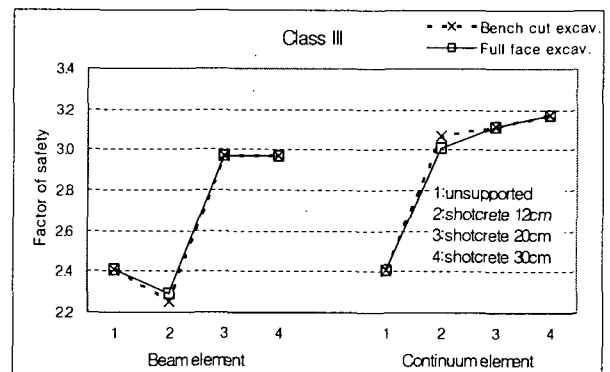
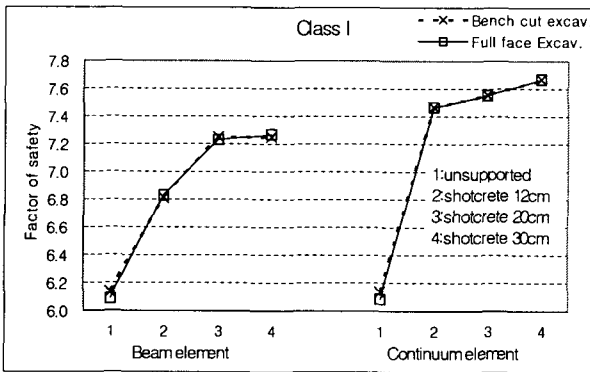
2차원해석 결과 슛크리트를 보요소로 가정한 경우와 연속체요소로 가정한 경우 암반등급이 높을수록 안전율은 높게 나왔으며, 슛크리트의 모델링 방법에 따른 안전율은 거의 같은 양상을 보였으나 연속체요소로 모델링한 경우가 보요소로 모델링한 경우보다 전반적으로 안전율이 높게 나왔다. 또한 측압계수가 다소 높은 경우와 암반등급이 다소 불량한 경우, 상하분할굴착의 경우에서 상이한 결과의 안전율이 계산되었다.



(a)  $K_0=0.5$



(b) K<sub>0</sub>=1.0

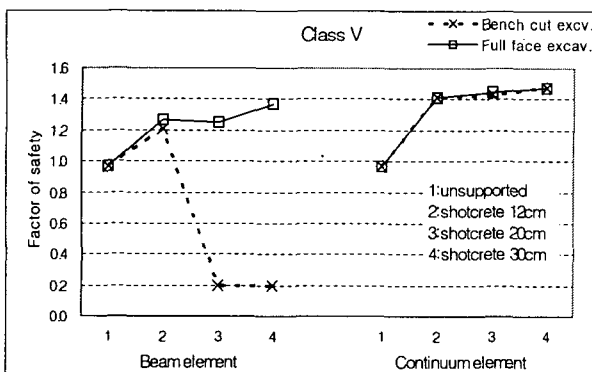


(c) K<sub>0</sub>=2.0

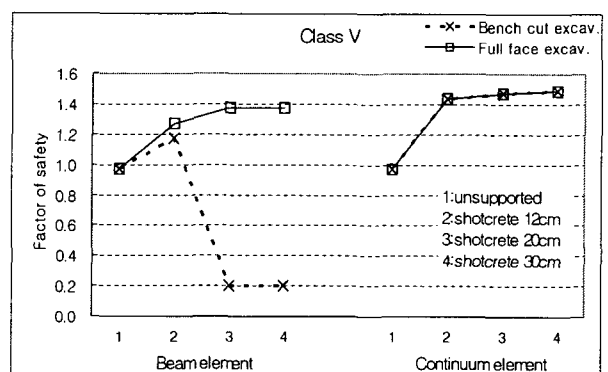
Fig. 4. Safety factors of the analysis tunnel (Class I and III)

Fig. 4는 1등급 암반과 3등급 암반의 경우로 축압계수에 따른 안전율의 차이를 보여준다. 축압계수가 0.5 및 1.0에서 보요소로 모델링한 경우 숏크리트 두께의 증가에 따른 안전율의 증가는 미비하여 거의 증가를 보이지 않고 있지만 연속체요소로 모델링한 경우는 모든 축압계수에서 숏크리트 두께의 증가에 따라 안전율의 증가를 보이고 있다.

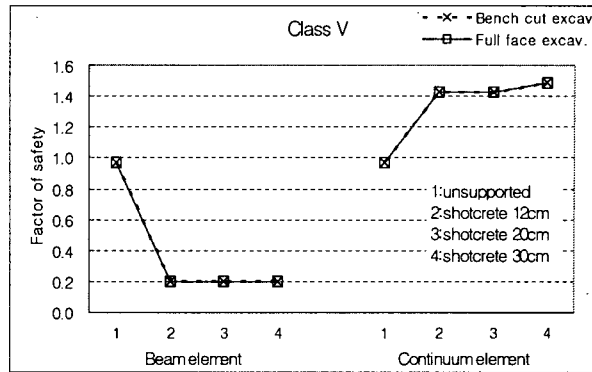
축압계수 2.0에서 1등급 보요소의 경우 숏크리트 두께에 따른 안전율 차이를 보면 숏크리트 두께가 12cm에서 20cm로 증가 시킬 경우 급격한 안전율의 증가를 보이지만, 숏크리트 두께를 30cm로 증가 시키면 안전율의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 3등급 암반의 경우 보요소로 모델링한 경우에 숏크리트 두께 12cm에서 상하분할 굴착과 전단면 굴착 모두에서 무지보로 굴착한 경우보다 낮은 안전율을 나타내고 있다. 일반적으로 무지보일 때 보다 숏크리트로 보강할 경우가 안전율이 높게 나와야 하지만 이 경우는 지보재의 휨 응력이 허용응력을 초과하여 지반의 파괴보다 지보재의 파괴가 먼저 일어났기 때문에 무지보일 때 보다 낮은 안전율로 나타났다.



(a) K<sub>0</sub>=0.5



(b) K<sub>0</sub>=1.0



(c)  $K_0=2.0$

Fig. 5. Safety factors of the analysis tunnel (Class V)

Table 5. The failure location of shotcrete

Class V					
$K_0=0.5$	Bench cut	Shotcrete thickness	20cm	30cm	
		Type of failure	tension failure	tension failure	
		Location of failure	side wall	side wall	
		Stress of failure	$-9.98\text{kg/cm}^2$	$-9.92\text{kg/cm}^2$	
$K_0=1.0$	Bench cut	Shotcrete thickness	20cm	30cm	
		Type of failure	tension failure	tension failure	
		Location of failure	side wall	side wall	
		Stress of failure	$-12.97\text{kg/cm}^2$	$-14.05\text{kg/cm}^2$	
$K_0=2.0$	Full face	Shotcrete thickness	12cm	20cm	
		Type of failure	compression failure	compression failure	
		Location of failure	crown	crown	
		Stress of failure	$162.36\text{kg/cm}^2$	$126.24\text{kg/cm}^2$	
	Bench cut	Shotcrete thickness	12cm	20cm	30cm
		Type of failure	compression failure tension failure	compression failure tension failure	compression failure tension failure
		Location of failure	side wall	side wall	side wall
		Stress of failure	$-100.71\text{kg/cm}^2$ $207.74\text{kg/cm}^2$	$-74.30\text{kg/cm}^2$ $150.74\text{kg/cm}^2$	$-65.67\text{kg/cm}^2$ $127.53\text{kg/cm}^2$

Fig. 5는 5등급 암반의 경우로 1등급과 3등급 암반과는 달리 보요소로 모델링하여 해석한 결과 상하 분할 굴착과 전단면 굴착의 변화양상이 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 보요소로 모델링한 경우 Fig. 5의 (a) (b)에서와 같이 측압계수가 0.5와 1.0에서 무지보로 굴착할 경우 안전율이 1이하로 지보를 하지 않은 경우 파괴가 예상되며 슛크리트로 보강할 경우 두께 12cm에서는 무지보일 때 보다 안전율의 증가를 보여 무지보보다 안정성을 나타내고 있다. 하지만 슛크리트를 두께 20cm와 30cm로 보강을 했음에도 불구하고 무지보보다 낮은 안전율로 계산되었다. 이러한 결과는 지반의 강도를 감소시키지 않은 상태에서

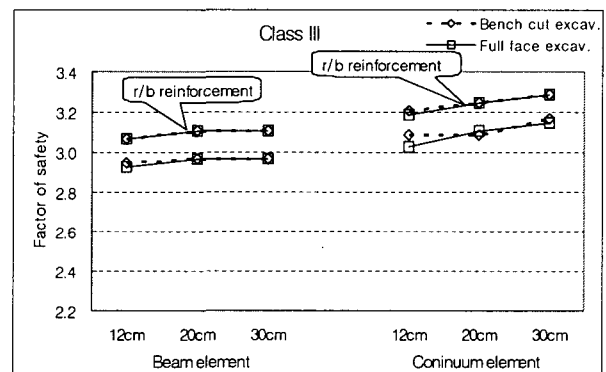
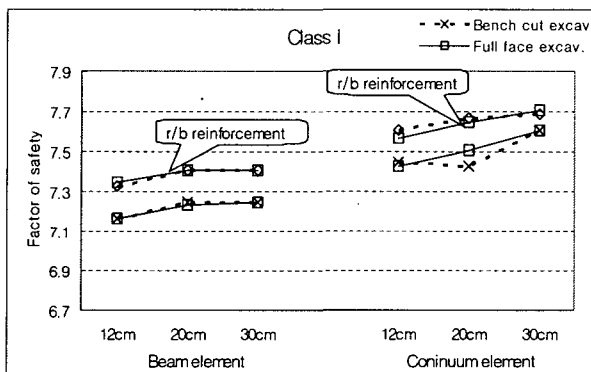
지보재의 휨 응력이 허용응력을 초과하여 지보재의 파괴가 발생한 결과이며, 축압계수가 2.0인 경우는 보요소에서 전단면의 경우도 지반의 강도를 감소시키지 않은 상태에서 파괴가 일어난 것을 알 수 있다.

연속체요소로 모델링한 경우는 1등급 암반과 3등급 암반의 경우와 같은 변화 양상을 보이고 있다. 무지보일 경우에 안전율이 1.0 이하로 파괴가 예상되지만 숏크리트를 두께 12cm로 보강 하면 1.4이상의 안전율을 보이며 숏크리트를 두께 20cm, 30cm로 증가할수록 안전율의 증가를 보여 터널의 안정성정도를 안전율의 증가로 나타낼 수 있었다. Fig. 5.에서 보요소의 경우 안전율을 0.2로 나타낸 것은 지반의 강도를 실제의 지반강도보다 5배로 증가시켜도 지보재의 파괴가 일어난 경우로 강도감소기법으로 구할 수 있는 최소의 안전율을 나타낸 것이다.

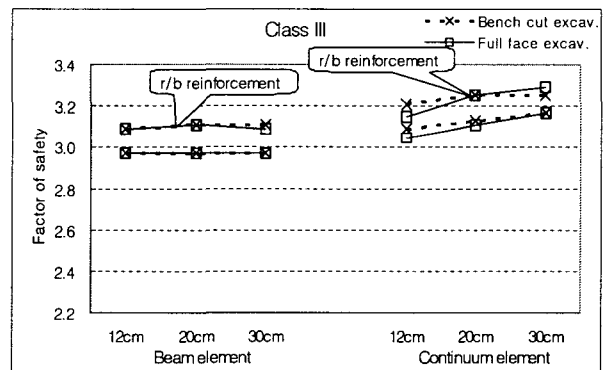
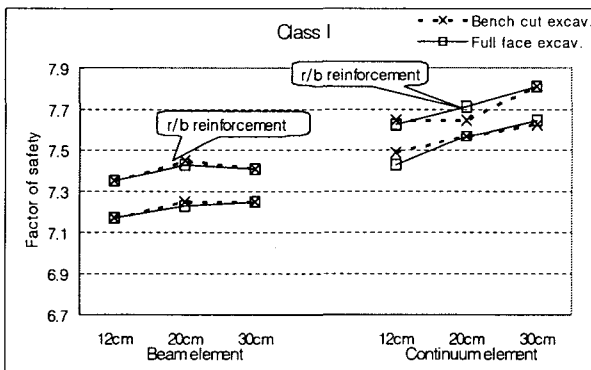
Table 5는 5등급 암반에서 지반의 강도를 감소시키지 않은 상태에서 지보재의 파괴가 일어난 경우에 대해서 정리한 것이다. 축압계수가 0.5 에서 2.0으로 수평응력이 증가할수록 숏크리트의 인장응력이 증가함을 알 수 있으며, 축압계수가 2.0일 때는 숏크리트의 인장응력과 압축응력이 급격히 증가하여 지보재의 파괴가 일어난 것을 알 수 있다. 또한 숏크리트 두께의 증가에 따라 압축응력은 줄어들어 30cm 이상을 적용한다면 압축응력은 허용응력내의 값으로 나타날 것으로 예상된다. 인장응력의 경우는 보요소로 모델링하는 경우 상부공정의 완료 후 하부굴착과 동시에 응력의 집중으로 굴착경계부분에서 과도한 인장응력이 발생하였다. 이러한 결과는 보요소의 불안정한 요인으로 지보재의 파괴를 고려한 터널의 안전율에서는 숏크리트의 모델링 방법으로 적당하지 않음을 보여준다.

### 3.2 록볼트 보강효과

록볼트 보강에 의한 안전율의 증가는 모든 등급에서 일정한 증가 추세를 보이고 있다. Fig. 6의 (a), (b), (c)는 1등급과 3등급암반의 경우로 축압계수의 증가에 따라 보요소와 연속체요소 모두에서 숏크리트의 두께의 증가에 따라 록볼트로 보강할 경우 일정량의 안전율 증가를 보이고 있다.

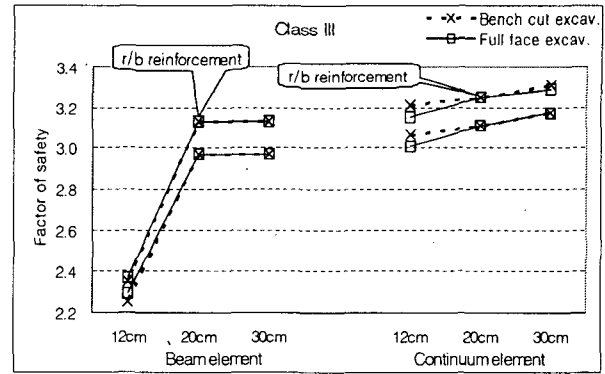
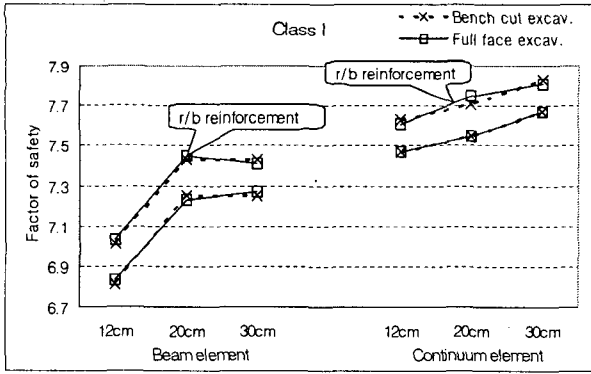


(a)  $K_0=0.5$



(b)  $K_0=1.0$

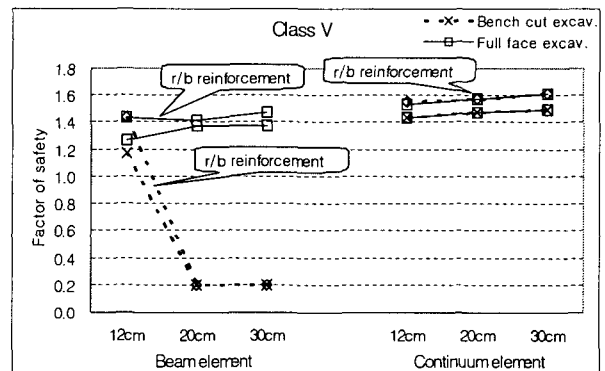
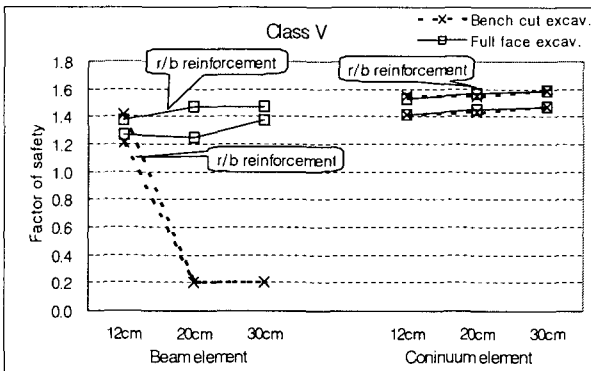




(c)  $K_0=2.0$

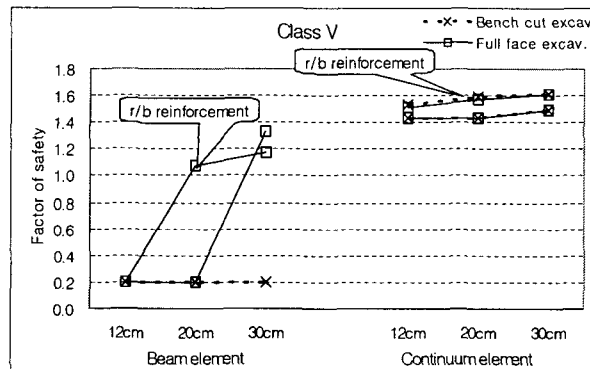
Fig. 6. Safety factors of the analysis in the case of tunnel rockbolt reinforcement (Class I and III)

1등급 암반의 경우 록볼트 보강에 따른 안전율의 증가는 슛크리트로 보강한 경우보다 안전율이 보요소와 연속체요소로 모델링한 경우에서 약 0.2증가하였으며, 3등급 암반의 경우에는 1등급 보다 작은 0.15의 증가량을 보인다.



(a)  $K_0=0.5$

(b)  $K_0=1.0$



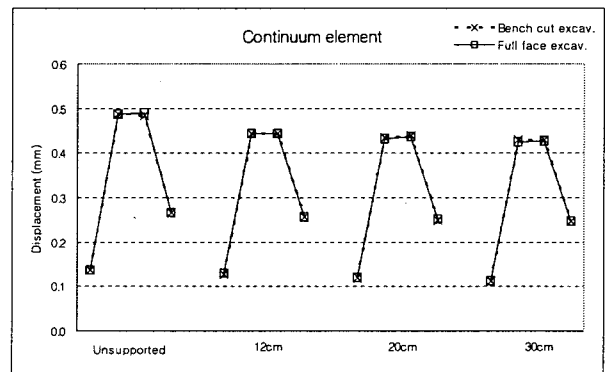
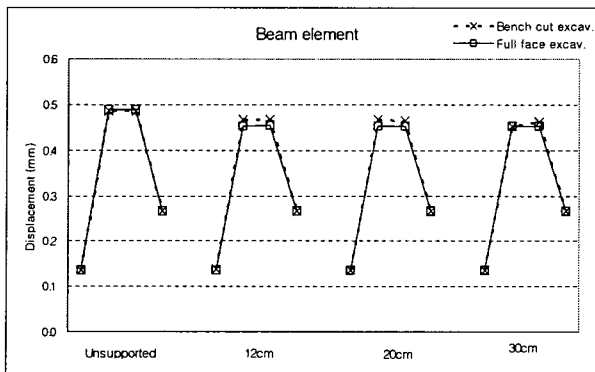
(c)  $K_0=2.0$

Fig. 7. Safety factors of the analysis in the case of tunnel rock bolt reinforcement (Class V)

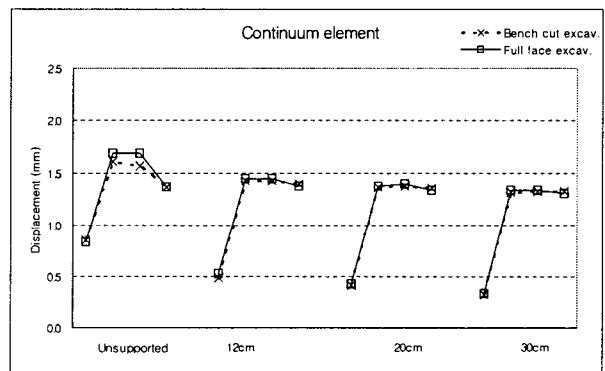
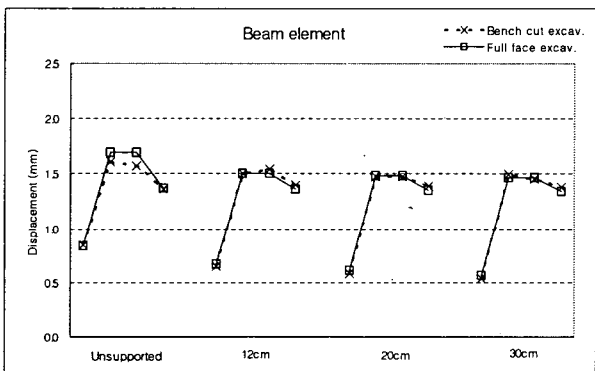
Fig. 7의 (a), (b), (c)는 5등급 암반의 록볼트 보강에 따른 지보재 모델링 방법 및 슛크리트로 두께에 따른 영향을 축압계수에 따라 그래프로 도시한 그림이다. 연속체요소로 모델링한 경우는 모든 축압계수에서 록볼트로 보강한 경우의 안전율이 약 0.1이 증가하였다. 보요소로 모델링한 경우는 축압계수 0.5 및 1.0에서 전단면 굴착의 경우 록볼트로 보강을 하면 안전율은 증가하여 보강효과를 나타내지만 상하분할

굴착은 록볼트로 보강을 하여도 주지보재인 숏크리트가 파괴되어 비현실적인 안전율 분포를 나타내고 있다. 다만 축압계수 2.0의 전단면 굴착에서는 숏크리트 두께 12cm에서 숏크리트만으로 보강한 경우는 숏크리트의 파괴로 1이하의 안전율을 나타내지만 록볼트로 보강할 경우 1이상의 안전율을 나타내어 록볼트 보강에 따른 보강효과를 안전율로 나타내고 있다.

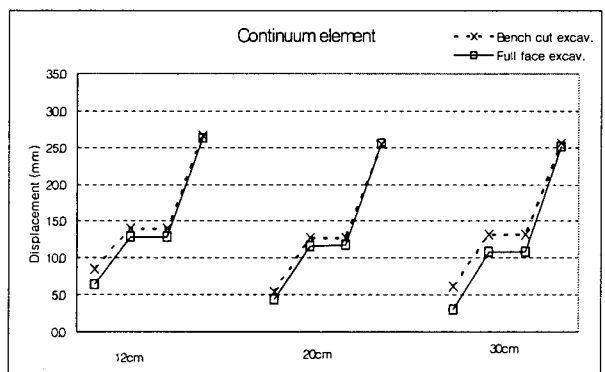
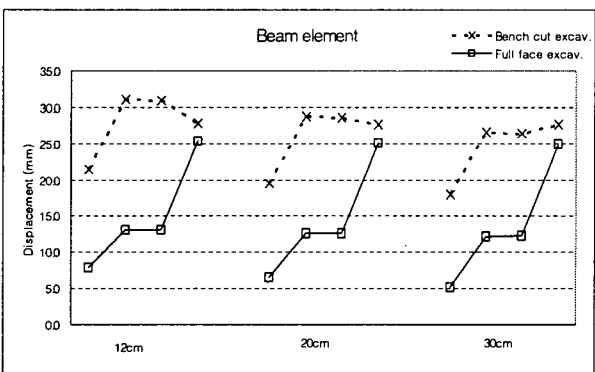
록볼트의 보강효과를 보요소와 연속체요소로 모델링하여 암반등급 및 축압에 따른 영향을 비교해본 결과 암질이 양호한 1등급과 3등급 암반에서는 축압계수와 굴착방법에 따른 안전율 변화 양상이 비슷한 반면 암질이 불량한 5등급 암반에서는 보요소로 모델링하여 안전율을 계산한 결과 축압계수가 0.5와 1.0에서 숏크리트 두께 12cm일 때 록볼트의 보강에 따른 안전율의 증가로 록볼트의 보강효과를 볼 수 있으나 숏크리트 두께 20cm, 30cm에서는 록볼트로 보강할 경우에도 숏크리트의 파괴로 1이하의 안전율을 나타내고 있다.



(a) Class I



(b) Class III



(b) Class V

Fig. 8. Convergence of the analysis tunnel ( $K_0=2.0$ )

또한 암반등급이 1등급인 경우는 록볼트 보강효과가 안전율 약 0.2의 증가로 나타났지만 등급이 3등급 및 5등급으로 암질이 불량할수록 보강효과는 떨어져 약 0.15 및 0.1로 록볼트 보강효과가 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.3 내공변위 비교

1등급 3등급 5등급 암반에서 보요소와 연속체요소로 슛크리트를 모델링하여 터널의 내공변위를 비교해본 결과 축압계수가 2.0인 경우에 Fig. 10과 같으며, 내공변위의 측정지점은 천단부와 좌·우 측벽부, 바닥부에서 변위를 비교하였다.

1등급 암반과 3등급 암반의 경우는 보요소와 연속체요소로 모델링한 경우 축압계수 2.0에서 변위의 절대값 및 변위변화 양상이 거의 일치하는 반면 5등급 암반의 경우 모델링 방법에 따른 차이를 보이고 있다. 보요소로 모델링한 경우는 1등급 암반과 3등급 암반의 경우와는 다른 양상을 보여주고 있다. 굴착 방법에 따른 차이를 보면 보요소로 모델링한 경우는 상하분할 굴착이 전단면 굴착보다 모든 측정 부분에서 큰 것을 알 수 있으며, 연속체요소로 모델링한 경우는 굴착방법에 따라 같은 변화양상을 보이고 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 지보재의 파괴를 보다 현실적으로 고려할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 허용응력 설계법에 의해 지보재의 파괴를 고려하여 터널의 안전율을 구하는 기존 방법과 수치해석적으로 비교되었다. 본 연구 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 보요소로 모델링한 경우는 3등급 및 5등급 암반에서 터널의 안전율이 비현실적으로 매우 작게 산정되는 불안정한 요인을 보이고 있다. 반면에 연속체요소로 모델링한 경우는 지보재의 응력을 확인할 수는 없지만 지보재의 증가와 굴착방법에 따라 터널의 안전율이 불안정해지는 상황은 없었다.
- 2) 록볼트 보강에 따른 터널의 안정성을 안전율로서 나타낼 수 있으며 암반등급이 양호할수록 보강효과가 높은 것으로 나타났다.
- 3) 변위를 비교한 결과 지보재 모델링 방법에서 보요소로 모델링한 경우는 암질이 불량한 5등급 상하분할 굴착에서 측벽부에 과도한 변위가 발생하였으며, 지보재의 응력 또한 측벽부에서 과도한 인장응력이 발생하여 지보재가 파괴되었다. 이는 보요소로 모델링할 경우 암질이 불량한 암반에서는 문제점으로 적절하지 못하다고 판단된다.
- 4) 종합적으로 판단할 때, 본 연구를 통하여 지보재의 모델링 방법에 따른 안전율의 차이를 보였으며, 안전율 계산에는 지반과 같이 거동할 수 있는 지보재 모델링 방법인 연속체요소로 모델링 하는 것이 암반등급이 낮은 불량한 암반의 안전율을 구하는데 사용하는 것이 변위와 응력측면에서 안정한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

향후 본 연구에서 제시된 방법으로 구한 터널의 안전율을 통해 적정 지보재의 설치량 등을 판별하여 경제적인 지보재 설계가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설기술개발사업을 위한 연구지원(과제번호: 공사핵심기술C01) 및 삼성건설의 연구지원에 의해 수행되었으며, 본 연구를 위해 지원해주신 관계당국 및 기관에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 유광호, 박연준, 배규진, (2000) “연약 암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가”, 대한터널협회 논문집, Vol. 2, No. 3, pp.47-57.
2. 한국도로공사 도로연구소, (2001) “강섬유보강 슛크리트의 성능 향상 및 품질기준 정립(Ⅱ)” .
3. 유광호, 박연준, 강용, (2001) “절리암반 터널의 안전을 평가를 위한 수치 해석적 연구”, 한국암반공학회, 제 11 권, 제 3 호, pp.279-288.
4. 한국도로공사 도로교통기술원, (2002) “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구” .
5. 박종원, 박연준, 유광호, 이상돈, (2004) “터널의 안전을 평가 기법에 관한 연구”, 한국암반공학회, 제 14 권, 제 5 호, pp.327-338.
6. Itasca Consulting Group, inc. (1995) FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.3, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
7. Dawson E. M., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999) “Slope Stability Analysis by strength reduction” , Geotechnique, Vol. 49, No. 6, pp.835-840.