

# 암반절리와 시공단계를 고려한 지하구조체의 해석

김 문겸, 장 정범  
연세대학교 토목공학과

## Abstract

This paper explains outline of a behavior analysis program for underground structures, and its application to a tunnel problem. The program can deal with elasto-plastic behavior of medium and supporting structures, discontinuous behavior due to existing joint, creation and propagation of cracks, in-situ loading condition, and incremental behavior due to stepwise excavation, etc. The program also has additional capabilities such as graphic output of mesh, displacement pattern, stress condition, and safety factor contour, and automatic mesh generation during the excavation steps.

## 1. 서론

최근에 있어서 문화의 다변화에 따라 도시구조가 다차원화되어 지하구조물의 건설이 급증하고 이에 따라 구조물의 심층화, 복잡화가 필연적이게 되었다. 따라서, 그 설계 및 시공에 있어서 지반과 지보의 구조적 거동을 합리적이고 현실적으로 해석하여 설계에 적용시키는 것이 필요하게 되었다. 특히, 암반체는 절리부가 존재하고 이러한 절리는 암반체의 구조적 거동에 큰 영향을 미치므로 이 영향을 해석에 반영하는 것이 필요하다.<sup>1)</sup>

탄성역학 또는 소성역학에 의한 암반체의 해석은 그 해가 쉽지 않고 또한 해를 구할 수 있는 대상이 극히 제한되어 있다. 따라서 절리가 존재하는 경우에 엄밀해에 의한 해석이 시도된 경우는 없고 지하구조물의 설계에 있어서 기존하는 절리의 영향은 탄성계수를 감소시키는 등 경험에 의존해 왔다.<sup>2)</sup> 1960년대 전자계산기의 효율화와 수치해석기법 및 지하계측기술의 발전은 상술된 문제를 해결할 수 있는 합리적인 해석방법을 연구할 기반을 마련하게 되었다. 따라서 1970년대 이후의 지하구조물의 안정성 검토 및 변형거동의 해석에 유한요소기법이 사용되고 이 해석기법은 시공시 변형 및 응력을 실측함과 병행하여 효율적으로 설계 및 재설계에 반영되고 있다.<sup>3)</sup> 또한, 1980년대에 들어와 유한요소해석과 더불어 선형 및 비선형 경계요소기법의 사용이 활발히 연구되고 있다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 유한요소기법을 이용하여 암반체 내에 존재하는 절리가 지하구조체의 거동에 미치는 영향과 굴착단계의 영향을 고려하여 지하구조체를 해석하는 하나의 방식을 제시하고, 이를 예제에 적용하여 그 결과를 보이고자 한다. 이를 위하여 각 굴착단계에 따라 절리부의 응력-변형을 구성방정식을 정립하여 유한요소화하고 이를 이용하여 절리를 가진 암반의 굴착에 따른 구조거동을 해석하고자 한다.

절리를 가진 암반체의 거동해석은 다음과 같은 세가지 방법으로 접근할 수 있다. Interface 요소를 사용하여 절리를 모형화하여 암반체와의 상호작용을 모형화하는 것이 그 하나이다. 5) 단위 block 의 결합체로 암반체를 모형화하여 해석할 수도 있다. 6) 또는 연속적인 절리가 한 유한요소에서 균일하게 형성되는 것으로 보아 개개의 유한요소에서 절리를 연속체로 모형화하여 구성방정식을 사용하므로써 해석할 수도 있다. 7) 그러나, Interface 요소를 사용할 수 있는 대상은 fault 와 같은 대단위 절리를 가진 암반체이고, 지표부위와 같이 조밀하고 연속적인 절리가 존재하는 경우는 해석의 양이 커지므로 비효율적이게 된다. 또한, 단위 block 을 사용할 경우는 연속체 역학에 기준한 유한요소해석과의 결합이 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 개개 유한요소의 적분점에서 절리를 이방성 연속체로 모형화하는 방법을 취하도록 한다. 이방성은 절리의 수직 및 수평방향의 응력-변형률 관계를 수정하여 모형화하였다.

해석은 암반의 구조적 거동을 수치화할 수 있는 비선형 유한요소 프로그램을 사용하여 수행하였다. 사용 프로그램은 기본적인 유한요소해석에 추가하여 암반체의 비선형 응력-변형률 관계, 암반체의 기존 절리에 의한 영향, 암반절리의 생성 및 전파, 암반의 이방성거동, shotcrete 및 lining 등 지보재의 비선형 거동, rockbolt 에 의한 응력보완효과, 지반 구성재료의 다양성, 암반체의 파괴역학적 거동에 의한 응력의 재분배, 굴착단계의 영향 등을 모형화할 수 있다.

본 연구는 진술된 연구목적을 효율적으로 달성하기 위하여 다음과 같은 제한된 범위 내에서 수행하였다. (1) 지반구조체는 평면변형률 상태에 있다고 가정한다. 일반적으로 지반구조체는 연속적인 매체 내에 존재하므로 구조체의 축방향으로의 차원이 단면의 차원에 비하여 클 경우 이러한 가정은 타당하다 할 수 있다. (2) 절리는 1 개 또는 2 개 방향으로 연속적으로 존재한다고 가정한다. 암반의 절리는 퇴적층의 형성 또는 지각변동에 따라 발생되므로 일반적으로 평행한 방향으로 2-3 조로 존재한다. 따라서, 대표적인 방향을 취하면 해석에 1 차로 반영할 수 있을 것이므로 방향성의 변수를 단순화하기 위하여 이와 같은 가정을 취한다. (3) 절리는 해석단면에 대하여 수직인 방향으로 연속된 경우에 제한한다. 실제의 절리는 단면에 대하여 임의의 각도를 가질 수 있으나, 수직일 경우가 구조체 축방향과 평행하고 큰 불안정 block 을 형성하므로 가장 취약하다. 8) 따라서, 구조체의 지보설계에 있어서 안전측 가정이다. (4) 절리에 따른 이방성 거동은 암반 및 절리의 파괴기구 형성에 따라 이에 대응되도록 절리의 연직 및 평행방향의 응력-변형률 관계를 수정함으로써 모형화한다.

본 유한요소 프로그램은 절리가 존재하는 토사 및 암반으로 이루어진 지하구조물의 비선형거동을 해석하기 위하여 암반 및 구조물은 4 절점 2 차원 평면변형률 요소로, 지보재인 rockbolt 는 트러스요소로 모형화하였다. concrete lining 및 shotcrete 는 2 차원 평면변형률 상태의 4 절점 선형요소로 모형화하였다.

## 2. 절리를 가진 암반체의 응력-변형률 관계

암반체의 비선형거동은 다음과 같이 세 가지로 대별되는 절리의 역학적 거동의

결과로 인식될 수 있다. 9) 즉, 기존의 절리면에 평행한 전단력에 의한 절리면을 따른 암반체의 활동 (sliding), 기존의 절리면에 수직방향으로 작용되는 인장력에 의한 분리 (opening), 또는 과잉응력의 작용에 따라 새로운 절리가 생성되는 파쇄 (cracking) 가 암반체의 응력-변형을 관계를 비선형화하는 원인이라고 보는 것이다. 이러한 거동은 파괴조건을 사용하여 모형화하여 유한요소화 할 수 있다.

### 암반체의 파괴조건

전술된 절리의 역학적 거동은 파괴조건을 사용하여 거동의 개시여부를 검토할 수 있다. 본 연구에서는 전단에 대하여 Mohr-Coulomb 조건을, 인장에 대하여 tension-cutoff 조건을 사용한다. 그림 1 은 인장응력  $\sigma$  와 전단응력  $\tau$  의 평면에 표시한 파괴조건으로서 암반체와 절리부 각각의 파괴조건을 표시하고 있다. 암반체의 파괴는 연성파괴 (ductile failure) 와 취성파괴 (brittle failure) 로 구별할 수 있는데, 이 구별은 해석의 단순화를 위하여, 절리의 거동과 상관없이 암반이 처너파괴되는 경우를 연성파괴, 절리의 역학기구에 의하여 파괴되는 경우를 취성파괴로 분리하여 모형화하였다.

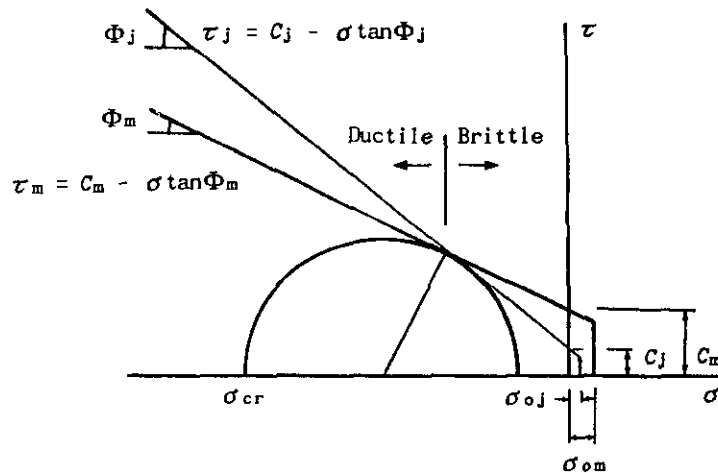


그림 1. Mohr-Coulomb 파괴조건

### 절리의 역학적 거동

연성파괴 영역의 응력상태에서는, 전단응력이 암반체의 전단강도에 이를 경우에 전단파괴면의 방향으로 전단균열 (shear crack) 이 발생된다. 즉, 암반의 마찰각을  $\theta_m$  이라 하면 균열은  $\pm(45^\circ + \theta_m/2)$ 의 방향으로 발생된다. 취성파괴의

응력상태에서는, 전단응력이 절리의 전단강도에 이를 경우에 최소주응력 방향으로 균열이 발생한다. 최대주응력이 tension cutoff 강도  $\sigma_{0m}$  에 이르면 최소주응력방향으로 인장균열(tensile crack)이 일어난다. 기존의 절리부에 평행한 전단응력이 절리부의 전단강도에 이르면 암반체는 활동한다. 이때 절리부의 전단강도는 취성영역에서는 절리부의 파괴기준에 따라  $\tau_j$  를, 연성영역에서는 암반체의 파괴기준에 따라  $\tau_m$  을 취한다. 기존 절리의 분리는 절리면의 수직응력  $\sigma$  가 절리부의 tension cutoff  $\sigma_{0j}$  에 이르면 일어난다. 이 경우 절리부의 수직 및 전단응력은 0 으로 수정된다. 그림 2 는 전습된 절리의 활동과 분리의 조건과 그에 대응하는 응력과 변형률의 구성관계를 보여주고 있다.

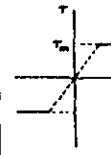
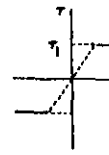

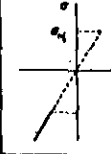
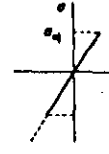
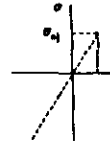
Failure Mode	Ductile Failure	Brittle Failure	Tensile Failure
Condition	$\sigma \leq \sigma_{cr}$ $\tau \geq \tau_m$	$\sigma_{cr} \leq \sigma \leq \sigma_{0j}$ $\tau \geq \tau_j$	$\sigma \leq \sigma_{0j}$
Mechanism	Sliding	Sliding	Open
Shear Stress			
Normal Stress			

그림 2. 절리의 활동 및 분리에 대한 응력-변형률 구성관계

### 3. 암반체의 유한요소모형

지하구조체를 효율적으로 비선형 해석하기 위해서는 해석치가 정도를 유지하는 한, 해석에 필요한 반복기법을 효율적으로 하여야 한다. 또한 하중은 실제의 재하상태를 정확히 모형화할 수 있어야 한다. 따라서, 본 연구에 사용된 유한요소 프로그램은 다음과 같은 기법을 사용하였다. 즉, 재하하중을 in-situ 응력에 따른 초기재하로 치환하였고, 반복계산의 수를 줄이기 위하여 implicit 반복기법을 사용하여 매 반복 시 접선강성도를 수정하여 사용하였다. 지하구조체는 단계별로 굴착시공되는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 굴착단계를 고려할 수 있는 중분반복기법을 사용하였다.

## 하중의 재하

수직방향 토압의 변화를 모형하기 위하여 경계응력에 추가하여 초기응력의 개념을 사용하였다. 작용된 외부하중은 절점하중  $\{F\}$  와  $[M]\{g\}$  로 표시되는 암반체의 자중에 의한 물체력이다. 여기서  $[M]$  은 구조체의 consistent 질량행렬이고  $\{g\}$  는 중력가속도의 절점벡터이다. 초기응력의 영향은 등가절점하중  $\{F_i\}$  로 표현된다. 물체의 복원력과 초기응력에 의한 절점하중의 합은 작용하중과 평형을 이루어야 하므로 평형방정식은 식 (1) 과 같이 표시할 수 있다.

$$[K] \{u\} + \{F_i\} = \{F\} + [M] \{g\} \quad (1)$$

여기서 강성도 행렬  $[K]$  와 미지절점변위  $\{u\}$  의 곱이 복원력벡터이다.

## Implicit 반복계산

식 (1) 에서 강성도  $[K]$  는 비선형 효과를 가지고 있고 매 계산 시의 추정된 변위  $\{u\}$  또는 응력  $\{\sigma\}$  에 관한 함수이다. 여기서는 반복수렴을 촉진하기 위하여 Newton-Raphson 방법으로 이  $[K]$  를 매 반복 시 수정하였다. 변위  $\{u\}$  에 대응되는 하중항을 조합하면 작용된 전체하중  $\{F_t\}$  는

$$\{F_t\} = \{F\} - \{F_i\} + [M] \{g\} \quad (2)$$

라고 할 수 있다.

다음은  $n$  번째 하중증분  $\{\delta F_t\}$  중  $i$  번째 반복계산에 대하여 절리모형의 implicit 반복을 설명한다. 요소  $e$  에서의 응력과 변형률은  $x, y$  평면내의 평면변형률 문제에 대하여 선형 탄성영역에서는

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \epsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 & -\nu \\ -\nu & 1 & 0 & \nu \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ -\nu & -\nu & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (3)$$

이다. 만일 암반 또는 절리 파괴기구가 생성되면 그림 2 의 조건에 의하여 이 관계는 수정된다.  $i$  번째 반복계산에서의 식 (3) 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{\epsilon_e\} = [D_e]_{i-1} \{\sigma_e\} \quad (4)$$

요소  $e$  에서의  $i$  번째 반복에서의 강성도  $[K_e]_i$  는 변형률-변위행렬을  $[B]$ , 전번 과정에서 계산된 응력-변형률 행렬을  $[D_e]_{i-1}$  라 할 때

$$[K_e]_i = [B]^T [D_e]_{i-1} [B] \quad (5)$$

이다. 따라서 변위의 증분  $\{\delta u_e\}_i$  는 조립된 평형방정식을 해석하여 구할 수 있다. 이에 따른 요소 e 에서의 응력의 증분  $\{\delta \sigma_e\}_i$  는 전술된  $[D_e]_{i-1}$  을 사용하여

$$\{\delta \sigma_e\}_i = [D_e]_{i-1} [B] \{\delta u_e\}_i - \{\delta \sigma_e\}_i \quad (6)$$

이다. 식 (6) 에서  $\{\delta \sigma_e\}_i$  는 초기응력의 증분을 의미한다. 현재의 추정된 응력  $\{\sigma_e\}_i$  는

$$\{\sigma_e\}_i = \{\sigma_e\}_{i-1} + \{\delta \sigma_e\}_i \quad (7)$$

이다. 이 응력에 대하여 절리의 거동여부를 검토하고 그림 2 와 같은 구성조건에 따라 수정된다. 따라서 i 번째 반복에서의 응력증분  $\{\delta \sigma_e\}_i$  는

$$\{\delta \sigma_e\}_i = \{\sigma_e\}_i - \{\sigma_e\}_{i-1} \quad (8)$$

이고  $[D]_i$  가 수정될 수 있다. 현재의 응력추정에 따라 요소에 있어서의 등가절점하중  $\{F_e\}_i$  은

$$\{F_e\}_i = \{F_e\}_{i-1} + \{\delta F_e\}_i \quad (9)$$

로 된다. 식 (9) 에서

$$\{\delta F_e\}_i = \int_V [B]^T \{\delta \sigma_e\}_i dV - \int_V [B]^T \{\delta \sigma_e\}_i dV \quad (10)$$

이다. 잉여력  $\{R\}_i$  는 각 요소에서  $\{F_e\}_i$  를 누가된 작용하중에서 빼고 전 요소에 대하여 합을 구함으로써 구할 수 있다. 반복의 수렴여부는 이 잉여력의 크기를 수렴기준과 비교하여 정할 수 있다.

#### 4. 시공단계의 고려

굴착과정에 관한 수치모형화는 지하구조물의 응력과 변형률을 결정하는데 있어서 중요하다. 굴착과정을 유한요소법으로 모형화하는 것은 본래의 요소망에서 유한개의 요소를 제거 및 재생성시키는 것을 필요로 한다. 본 해석에서 사용된 굴착단계별 모형화를 요약하면 다음과 같다.

(1) 원지반을 평형상태로 가정하고 모든 초기치를 0 으로 놓는다. 첫번째 굴착단계에 해당하는 요소망을 제거한 후 유한요소해석을 수행한다.

(2) 해석에서 얻어진 변위를 전단계의 각 절점변위에 더하여 좌표를 수정하고, 제거 또는 재생성되는 요소를 추가하여 새로운 요소망을 구성한다.

(3) 전단계에서 구한 요소의 응력상태 및 절리 거동상태를 새로운 요소망의 초기조건으로 전환시킨 후 새 단계의 해석을 실시한다.

굴착단계에 따른 요소망의 생성은 다음과 같은 방법으로 생성하게 된다. 즉, 기존의 요소를 소거하기 위해서 소거될 요소의 수와 번호를 입력한다. 요소가 소거되면 요소의 연속성을 유지하기 위하여 이후의 요소들이 새로운 요소번호를 갖게된다. 그 요소들을 이루고 있던 절점들은 다른 요소들과 공유하고 있는가를 확인하여 공유하지 않는 경우에 그 절점은 소거된다. 연속성을 위해 소거된 절점 이후의 절점들은 새로운 번호를 갖게 된다. 이러한 방법으로 생성된 자료는 프로그램 자체의 입력자료 검색과정을 통하여 입력자료의 오류를 찾아내게 된다. 검색과정에서 오류가 발생되지 않는다면 다음 단계의 해석을 수행하게 되고, 오류가 발생한다면 프로그램은 오류발생 내용을 화면상에 출력하면서 해석을 멈추게 된다.

#### 5. 설계단면의 안정성 검사

가정된 지보단면의 타당성을 검토하기 위하여 concrete lining 과 shotcrete 의 안정성을 검토한다. shotcrete 에 대해서는 shotcrete 타설직후, concrete lining 에 대해서는 최종 재하시의 응력을 계산하고 전단파괴에 대한 안전률과 인장파괴에 대한 안전률을 해석한다.

전단파괴에 대한 안전률 FSS 는 그림 3 과 같은 Mohr-Coulomb 파괴조건을 기준으로 다음 식에 의하여 구하였다.

$$FSS = RF / RS \quad (11)$$

여기서 RF 는 그림 3 의 0 점으로부터 파괴포락선에 내린 수선의 길이이고, RS 는 계산된 응력의 Mohr 원까지의 길이로 각각 다음과 같다.

$$RF = [(\sigma_1 + \sigma_2) \sin \phi] / 2 + C \cos \phi \quad (12)$$

$$RS = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \quad (13)$$

인장파괴에 대한 안전률 FST 는 인장강도에 대한 인장축 주응력의 비로서 다음 식에 기준하였다.

$$FST = \sigma_0 / \sigma_1 \quad (14)$$

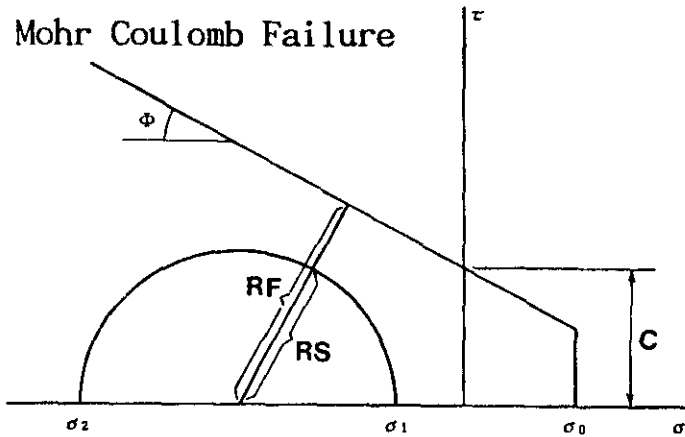


그림 3. Mohr-Coulomb 파괴조건

## 6. 해석결과

### 해석대상

그림 4 와 그림 5 는 해석단면의 유한요소망과 지보재 형상을 도시한다. 본 해석에서는 해석대상의 기하학적인 형태가 터널중심축을 중심으로 대칭을 이루므로, 중심축을 중심으로 하여 반단면 해석을 수행하였다. 해석단면은 지반을 177 개, shotcrete 를 10 개, concrete lining 을 14 개 요소로 모형화 하였으며 구조체는 평면변형률 상태에 있는 것으로 해석하였다. 해석단면에 작용하는 하중은 중력장에 의한 자중을 고려하였다. 자중은 지반을 구성하는 각 층의 단위질량을 기준으로 하여 각 유한요소의 적분점에서 상부 적재중량을 계산하여 해석에 수직하중으로 반영하였다. 수평방향으로는 정지토압계수  $K_0$  를 사용하여 수직하중에 대한 비례식에 의하여 재하하였다. 본 해석에서는  $K_0$  값으로 0.5 를 사용하였다. 재하하중은 시공단계별로 분할재하되는 것으로 하였다. 시공단계별 재하율은 표 1 과 같이 분할재하되는 것으로 하였다. 표 2 는 해석에 사용된 지반 및 지보재의 물리적 성질을 보여주고 있다.

표 1 시공단계별 하중분담율

굴착단계	굴 착 내 용	하중분담율
1	상부 반단면 굴착	0.4
2	상부 반단면 shotcrete 와 rockbolt 보강	0.7
3	상부 반단면 concrete lining 보강	1.0
4	하부 반단면 굴착	0.4
5	하부 반단면 shotcrete 와 rockbolt 보강	0.7
6	하부 반단면 concrete lining 보강	1.0



SCALE

(단위: m)

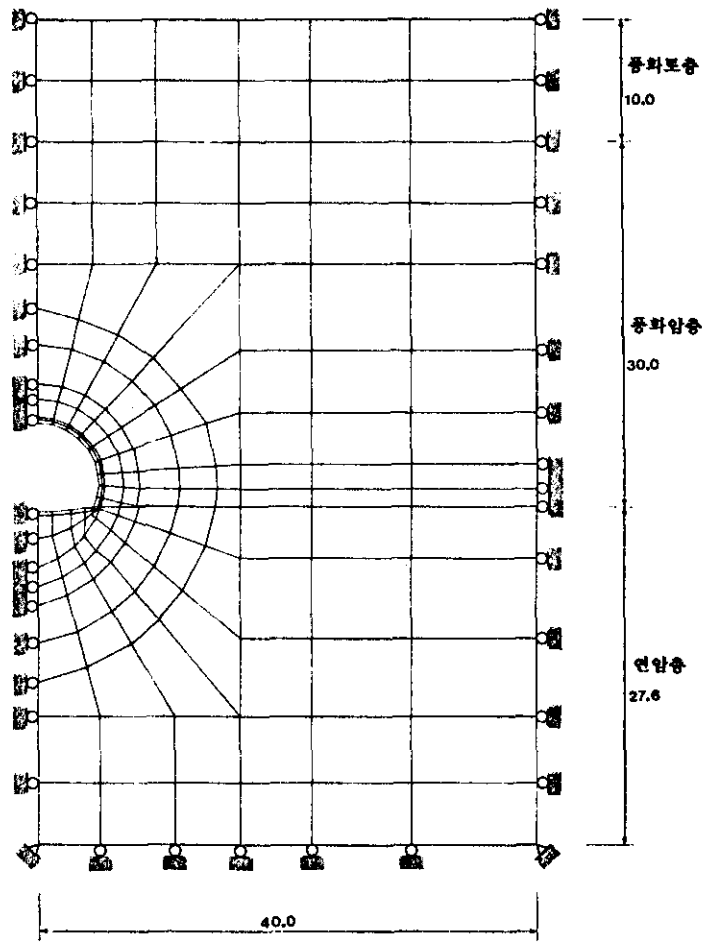


그림 4. 해석단면의 유한요소망

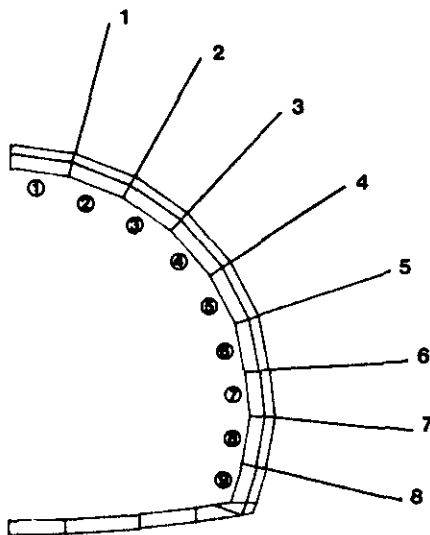


그림 5. 해석단면의 지보재 형상

표 2 해석에 사용된 지반 및 지보재의 물리적상수

구 분		물 리 적 성 질					
		탄성계수 tonf/m <sup>2</sup>	포아손비	단위질량 tonf/m <sup>3</sup>	점착력 tonf/m <sup>2</sup>	마찰각 Deg.	인장강도 tonf/m <sup>2</sup>
지 반	풍 화 토	8,000	0.286	2.0	2.0	25.0	2.0
	풍 화 압	100,000	0.231	2.2	5.0	35.0	5.0
	연 압	500,000	0.200	2.4	10.0	40.0	10.0
지 보 재	soft shotcrete	500,000	0.200	2.4	200.0	30.0	100.0
	hard shotcrete	1,500,000	0.200	2.4	500.0	35.0	100.0
	concrete lining	2,100,000	0.200	2.5	500.0	30.0	100.0
	rockbolt	21,000,000	-	-	-	-	35,000.0

변위

표 3 은 지보재로서 shotcrete 및 concrete lining 을 사용할 경우에 단면의 시공단계에 따라 계산된 변위의 양이다. 표에서 천정부와 저면부는 수직변위를 나타내며 측벽부는 수평변위를 나타낸다. 그림 6 으로부터 그림 11 은 단면의 변형형태를 각 해석경우 별로 보여주고 있다.

표 3 해석단면에서의 시공단계별 변위계산량

(단위: cm)

굴착단계	부 위		
	천 정부	측 벽 부	저 면 부
1	-0.62	-0.03	-0.10
2	-0.93	0.07	-0.11
3	-1.13	0.12	-0.05
4	-1.29	-0.07	0.32
5	-1.69	-0.03	0.33
6	-2.23	-0.01	0.37

거동

지반의 굴착에 따른 주변 암반의 역학적 거동은 지보재의 선택에 중요한 정보를 준다. 그림 12 로부터 그림 17 까지는 해석단면에 있어서 각 시공단계에서 발생하는 절리의 파쇄 및 활동의 전파영역을 보여준다. 이 활동은 기존 절리방향의 전단응력이 전단강도에 이르러 발생된 것이다. 그림 12 와 그림 13 으로부터 굴착후 굴착부 측면 방향으로 활동 및 파쇄영역이 발달됨을 볼 수 있다. 그러나 shotcrete 와 영구 lining 타설에 의하여 활동 및 파쇄영역이 현저하게 줄어들면서 안정된다는 것을 그림

scale (cm)

0. 10.

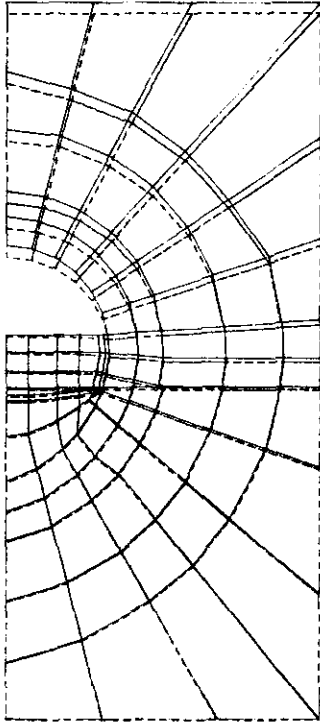


그림 6. 무보강 - 40 × 하중의 경우 : 터널주변 변위형태

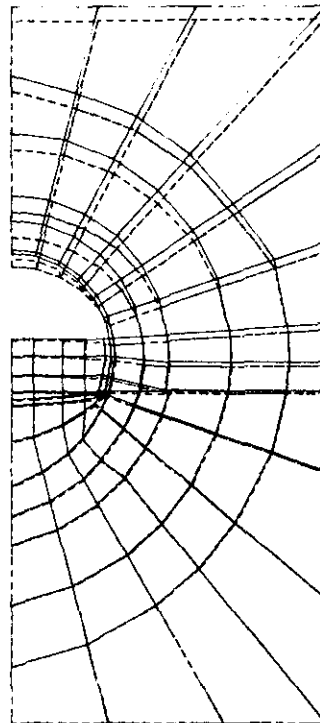


그림 7. SHOTCRETE + ROCKBOLT 보강 - 70 × 하중의 경우 : 터널주변 변위형태

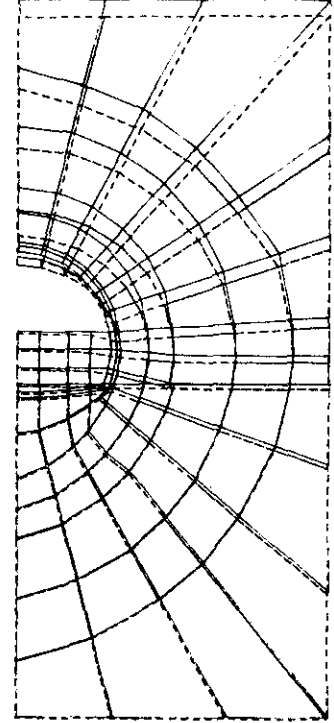


그림 8. CONCRETE LINING 보강 - 100 × 하중의 경우 : 터널주변 변위형태

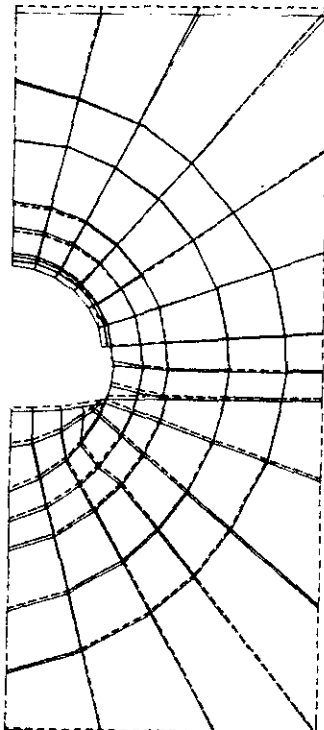


그림 9. 무보강 - 40 × 하중의 경우 : 터널주변 변위형태

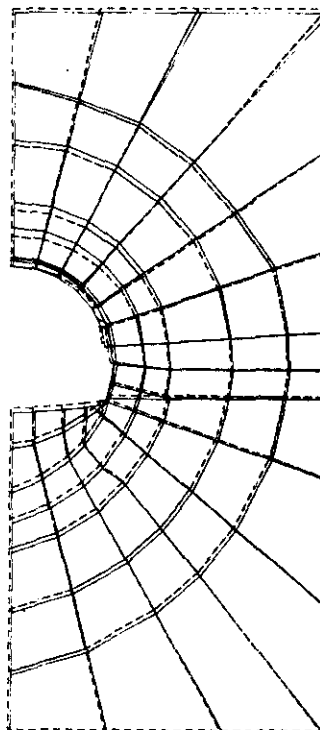


그림 10. SHOTCRETE + ROCKBOLT 보강 - 70 × 하중의 경우 : 터널주변 변위형태

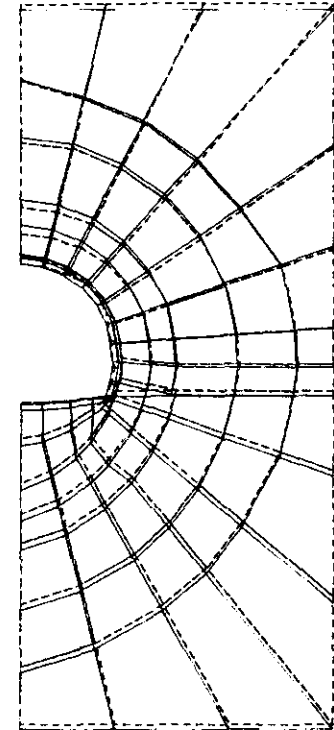


그림 11. CONCRETE LINING 보강 - 100 × 하중의 경우 : 터널주변 변위형태

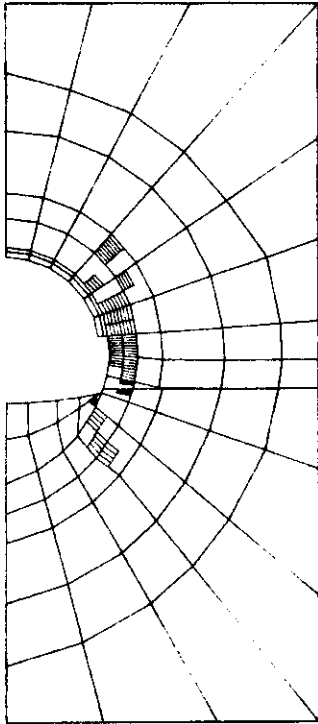


그림 12. 무보강 - 40 m 하중의 경우 : 활동영역

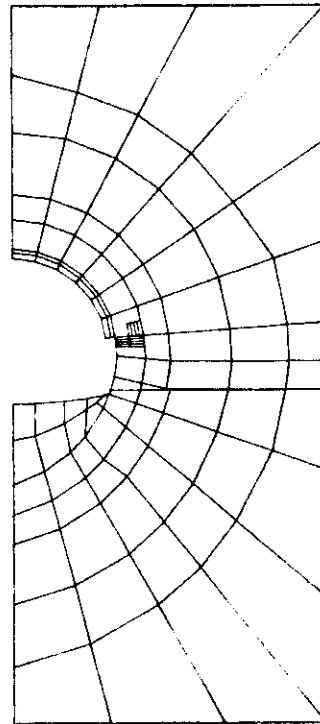


그림 13. 무보강 - 40 m 하중의 경우 : 파쇄영역

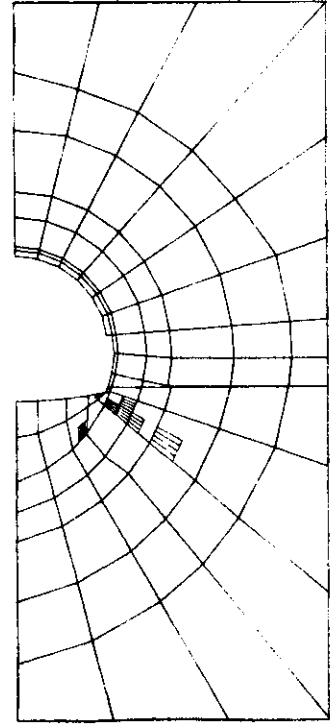


그림 14. SHOTCRETE + ROCKBOLT 보강 - 70 m 하중의 경우 : 활동영역

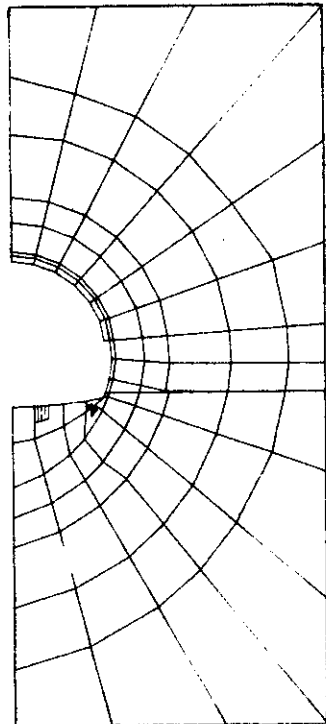


그림 15. SHOTCRETE + ROCKBOLT 보강 - 70 m 하중의 경우 : 파쇄영역

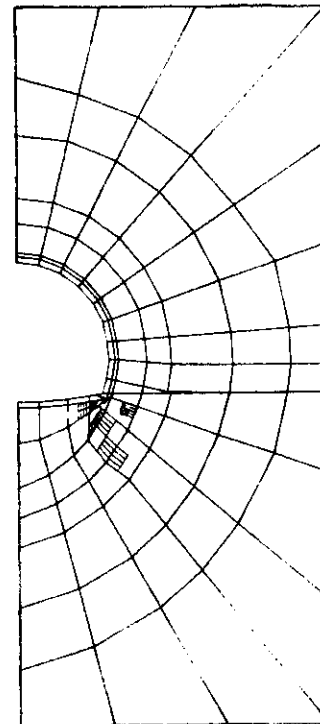


그림 16. CONCRETE LINING 보강 - 100 m 하중의 경우 : 활동영역

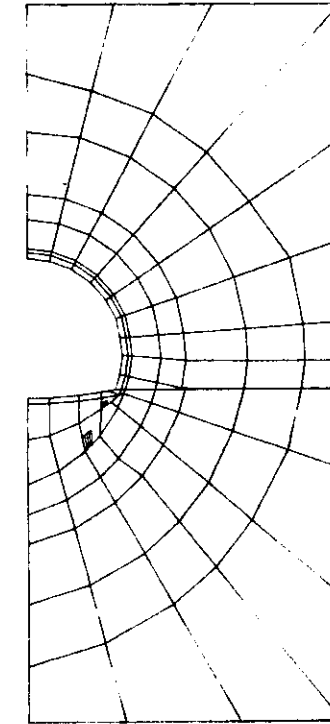


그림 17. CONCRETE LINING 보강 - 100 m 하중의 경우 : 파쇄영역

16 과 그림 17 로부터 알 수 있다. 보강후 하부구석에 발생하는 응력집중에 의한 미세한 절리의 활동은 저면부 포장에 의하여 저항이 충분히 가능하다.

#### SHOTCRETE 응력

최종 시공단계에서의 shotcrete 내부에 발생하는 최대 압축응력은 측벽부에서 74.4 kgf/cm<sup>2</sup> 로 해석되었다. 그림 18 은 shotcrete 와 lining 타설후 (100 % 하중재하) 에 있어서 shotcrete 의 응력분포 양상을 도시한 것이다.

#### LINING 응력

영구 lining 30 cm 타설시, lining 내부의 최대 압축응력은 측벽부에서 52.0 kgf/cm<sup>2</sup> 로 해석되었다. 거동의 분석결과, 전하중 재하시 lining 에는 파괴거동이 일어나지 않는 것으로 해석되었다. 그림 19 는 해석단면에 있어서 lining 요소 내의 최소 주응력 (최대 압축응력) 을 도시한 것이다.

#### ROCKBOLT 응력

표 4 는 shotcrete 및 영구 lining 타설시 (100 % 하중재하) 에 rockbolt 에 발생하는 응력을 표시한 것이다. 여기서 rockbolt 요소번호는 그림 5 에 표시한 번호를 나타낸다. 측벽부에 가까운 rockbolt 가 가장 큰 응력을 가짐을 알 수 있다.

표 4 해석단면에서의 rockbolt 응력

(단위: kgf/cm<sup>2</sup>)

rockbolt 번호	rockbolt 응력	rockbolt 번호	rockbolt 응력
1	6.6	5	-137.0
2	-60.1	6	-117.0
3	-118.0	7	109.0
4	-149.0	8	77.8

#### 설계단면의 안전률

안전률의 계산은 해석요소망의 각 적분점(gauss point) 에서 수행하였고, 각 점의 안전률은 전단안전률과 인장안전률 중 작은 값을 취하였다. 표 5 는 shotcrete 및 rockbolt, steel rib 가 설치된 직후의 shotcrete 의 안전률을 표 6 은 lining 타설후 shotcrete 의 안전률, 표 7 은 lining 타설후 lining 의 안전률을 각 적분점에서 계산하여 비교한 것이다. 이때 표 5 의 결과는 시공단계별 하중분담율에 따라 70 % 의 하중이 가해진 경우이고 표 6 과 표 7 은 100 % 의 하중이 가해진 경우이다. 이들 표로부터 shotcrete 타설후 shotcrete 의 최소안전률은 2.0 이고 lining 타설후 shotcrete 의 최소안전률은 1.84 로 나타났으며 lining 타설후 lining 의 최소안전률은 2.50 임

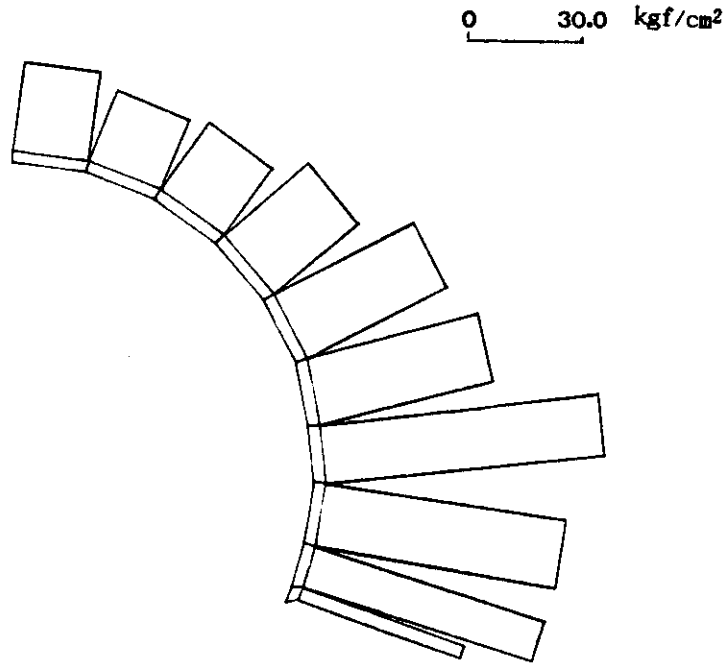


그림 18. SHOTCRETE 최대압축응력 - 100 \* 하중의 경우

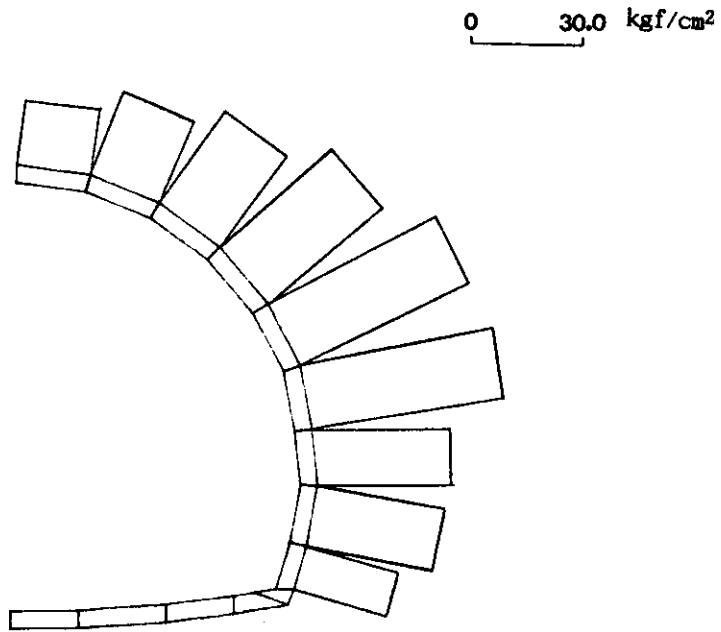


그림 19. LINING 최대압축응력 - 100 \* 하중의 경우

표 5 shotcrete 타설후 shotcrete 의 안전률

요소	적분점	안전률	요소	적분점	안전률
1	1	8.60	6	1	3.34
	2	8.60		2	3.97
	3	9.37		3	3.38
	4	9.37		4	3.72
2	1	7.26	7	1	2.27
	2	7.26		2	2.45
	3	7.87		3	2.25
	4	7.17		4	2.42
3	1	5.66	8	1	2.29
	2	5.59		2	2.35
	3	5.66		3	2.47
	4	5.59		4	2.53
4	1	4.27	9	1	2.90
	2	4.06		2	2.69
	3	4.11		3	3.19
	4	3.92		4	2.93
5	1	3.59	10	1	2.00
	2	3.44		2	2.50
	3	3.38		3	3.46
	4	3.25		4	3.74

표 6 lining 타설후 shotcrete 의 안전률

요소	적분점	안전률	요소	적분점	안전률
1	1	4.80	4	1	3.24
	2	4.80		2	3.01
	3	5.23		3	3.15
	4	5.23		4	2.87
2	1	4.22	5	1	2.72
	2	4.40		2	2.72
	3	4.59		3	2.64
	4	4.80		4	2.59
3	1	3.71	6	1	2.64
	2	3.83		2	2.99
	3	3.83		3	2.67
	4	3.97		4	2.93

요소	적분점	안전률	요소	적분점	안전률
7	1	1.87	9	1	2.15
	2	1.97		2	2.05
	3	1.84		3	2.35
	4	1.99		4	2.20
8	1	1.87	10	1	2.87
	2	1.91		2	2.78
	3	1.93		3	3.52
	4	2.00		4	3.31

표 7 lining 타설후 lining 의 안전률

요소	적분점	안전률	요소	적분점	안전률
1	1	9.93	8	1	3.07
	2	9.93		2	3.30
	3	5.00		3	3.27
	4	5.00		4	3.53
2	1	8.99	9	1	4.04
	2	8.99		2	4.04
	3	10.00		3	4.99
	4	10.00		4	5.28
3	1	7.57	10	1	4.91
	2	7.57		2	7.66
	3	8.22		3	6.29
	4	8.99		4	9.29
4	1	6.63	11	1	12.91
	2	5.74		2	12.77
	3	5.87		3	11.11
	4	5.49		4	11.11
5	1	4.97	12	1	42.94
	2	4.97		2	29.12
	3	4.40		3	5.00
	4	4.19		4	10.00
6	1	4.97	13	1	10.00
	2	5.33		2	10.00
	3	4.28		3	10.00
	4	4.54		4	85.37
7	1	3.03	14	1	10.00
	2	3.30		2	2.50
	3	3.06		3	10.00
	4	3.46		4	3.33

을 알 수 있다.

## 7. 결어

암반은 그 성질상 불연속면을 가지고 있으므로 암반을 균질등방인 매체로 가정하여 거동을 해석하는 것은 비현실적이다. 따라서 본 해석에서는 시공단계에 따른 암반과 구조물 재료의 비선형거동과 상호작용, 또한 지하굴착시 발생하는 응력변화에 따른 지반내 절리의 형성 및 활강(sliding) 을 고려한 구성방정식으로 부터 개발된 유한요소 프로그램을 사용하였다. 해석프로그램을 예제에 적용하여 구한 결과를 시공단계별로 구조체의 변형형태, 각 재료별 응력상태, 안전상태에 대하여 표시함으로써 본 해석의 가용성을 보였다.

## 참고문헌

1. Hoek, E. and Brown, E. T., *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, 1980, pp.183-243.
2. Lama, R. D. and Vutukuri, V. S., *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, Trans Tech Publication, 1978.
3. Golser, J., The New Austrian Tunneling Method ( Theoretical background - practical experience ), *Shotcrete for Ground Support*, ASCE & ACISP - 54, 1977, pp.323-347.
4. Brebbia et al. ed., *Boundary Elements*, Proceedings of the International Conference, Springer-Verlag, 1978-1988.
5. Heuze, F. E. and Barbour, T. G., New Models for Rock Joints and Interfaces, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.108, 1982, pp.757-776.
6. Dowding, C. H., Belytschko, T. B. and Yen, H. J., A Coupled Finite Element - Rigid Block Method for Transient Analysis of Rock Cavern, *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 7, 1983, pp.117-127.
7. Thomas, R. K., *A Material Constitutive Model for Jointed Rock Mass Behavior*, SAND 90-1418, Sandia National Laboratories, 1980.
8. Wilbur, L. D., Rock Tunnels, in *Tunnel Engineering Handbook*, Bickel, J. O. and Kuesel, T. R. ed., Van Nostrand Reinhold, 1982, pp.123-207.
9. Stagg, K. G. and Zienkiewicz, O. C., *Rock Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, 1968, pp.99-124.
10. Wittke, W., New Design Concepts for Underground Openings in Rocks, in *Finite Elements in Geomechanics*, Gudehus, G. ed., John Wiley & Sons, 1977, pp.413-478.
11. John, R. M., *Mechanics of Composite Materials*, McGraw Hill, pp.37-47.