

굴착진행과정을 고려한 터널단면의 점탄성 및 탄소성 응력해석

이 연구, 장현곤, 이정인
서울대학교 공과대학

Abstract

Elasto-plastic and Visco-elastic stress analyses were conducted for standard cross-section of subway tunnel in Seoul. Considering the procedure of excavation and reinforcement, excavated region was divided to multiple elements. And the progress of tunnel is simulated to be the removal of a series of layered elements by means of diminishing the stiffness of the portion progressively. Another method is to be free of stress due to excavation instead of stiffness.

In the analysis multiple element method was conducted with ADINA program, the stiffness removal method was adopted. For the same model, stress release method was carried out with Visco-Elastic Analysis program developed in Rock mechanics laboratory, Seoul National University(SNU-VEA). When upper tunnel excavated, displacements in roof were same for two results, but when bottom tunnel removed completely, displacement changes of rock in the stress release method exhibited very small amount compared with stiffness removal method.

1. 서론

암반중에 터널을 굴착할 경우 터널 주변 지반의 거동은 막장의 진행뿐만 아니라 굴착 및 보강순서에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 오늘날 이러한 터널의 거동을 예측하기 위하여 여러 방법들이 제안되고 있고, 이들 대부분은 유한요소법을 이용하고 있다. 서울대학교 공과대학 자원공학과 암석역학 연구실에서는 시간의 경과에 따르는 암석의 변형 즉 creep 거동을 고려한 터널의 점탄성 유한요소 해석 프로그램(SNU-VEA)을 개발하여 지하자원개발을 위한 갱도와 채굴공동, 양수 지하발전소, 그리고 석유지하비축기지 터널 등에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻었으며, 그 외에도 ADINA 프로그램과 Mr.Soil 프로그램을 사용하여 LPG 지하비축용 터널 단면 등에 대하여 암반중에 발달한 불연속면의 발달을 고려한 탄소성 해석을 실시하여 적용성을 검토한 바 있다. 그러나 이들 연구의 경우 컴퓨터 용량과 계산시간의 제약으로 인하여 2차원 평면변형을 조건하에서 해석을 하고 있다. 이러한 2차원 해석은 3차원 해석에 비해 막장의 진행효과를 충분히 반영하기에는 약간의 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 2차원 평면변형을 조건에서 근사적인 3차원 막장진행 효과를 반영시키는 방법을 사용하였다. 여기서는 두가지의 방법이 사용되었는데, 첫째 방법은 다중요소법(Multiple element method)으로서, 굴착되는 부분의 탄성계수를 굴착단계별로 배분하여 막장의 진행에 따라 탄성계수를 줄여나가는 것이다. 또 다른 방법은 굴착으로 생기는 경계면의 응력을 개방함으로써 굴착의 효과를 얻으며, 그 개방비율을 조정함으로써 2차원상에서 막장진행과정을 해석하는 방법이 사용되었다.

본 해석에서는 ADINA 프로그램의 요소제거 및 생성기능을 이용하고 위의 원리를 도입하여 막장의 진행효과를 반영한 2차원 탄소성 해석을 실시하였으며, SNU-VEA 프로그램의 굴착 응력 개방에 의한 해석결과를 비교하였다. 2차원 해석에 앞서 해석대상 터널에 대한 간단한 3차원 요소망을 구성하고 실제의 막장 진행과정에 따라서 탄성해석을 실시하였다. 3차원상의 변위특성을 이에 대응되는 2차원 탄성 해석에 의한 변위특성과 비교해 봄으로써 2차원 해석만으로 막장의 진행효과를 반영할 수 있음을 보였다.

2. 프로그램 개요

2.1 ADINA 프로그램

해석에 이용한 ADINA 프로그램은 Fig. 2.1 에 나타난 것과 같은 구조를 갖는다. Pre-Processor 인 ADINA-IN 에서는 해석에 필요한 모든 입력자료를 생성한다. 이 단계에서 요소가 자동 생성되며 Plotter 를 이용하여 이 단계에서 요소망의 이상 유무를 확인할 수 있다.

ADINA 에 의한 해석이 끝나면 해석결과와 관련된 자료는 PORTHLOE 화일을 통하여 ADINA-PLOT 이라는 Post-Processor 의 입력자료로 이용될 수 있도록 ADINA-PLOT DATA BASE 에 저장되게 된다. 원하는 해석결과는 ADINA-PLOT 명령어를 이용하여 그림 및 수치로서 받아볼 수 있다.

ADINA 를 이용한 터널해석에 있어서 터널의 굴착 및 지보재의 첨가를 모델화하는 것은 요소의 생성 및 제거기능 (element birth and death option)을 이용하여 수행할 수 있다. 프로그램 수행전 미리 암반요소군, 록볼트요소군, 슛크리트요소군을 선언한 후 단계별 굴착보강이 진행되면서 록볼트와 슛크리트요소군은 생성기능을 암반요소군은 제거기능을 이용하여 해석을 수행한다.

굴착단계를 시간의 변화로 가정하고 요소의 생성 및 제거기능을 설명하면 다음과 같다.

i) 요소생성기능

임의의 요소가 $(m+1)\Delta T$ 때 생성된다면 이 요소의 강성행렬은 $m\Delta T$ 때 전체 강성행렬에 무응력(stress free) 상태로 더해져 $(m+1)\Delta T$ 때 이 요소에 대한 최초의 해가 구해진다.

ii) 요소제거기능

마찬가지로 임의의 요소가 $(m+1)\Delta T$ 때 제거된다면 이 요소의 강성행렬은 $m\Delta T$ 시간에 전체 강성행렬에서 제거되며 이 요소의 힘 벡터는 $(m+1)\Delta T$ 시간에 전체 힘 벡터에서 제거된다.

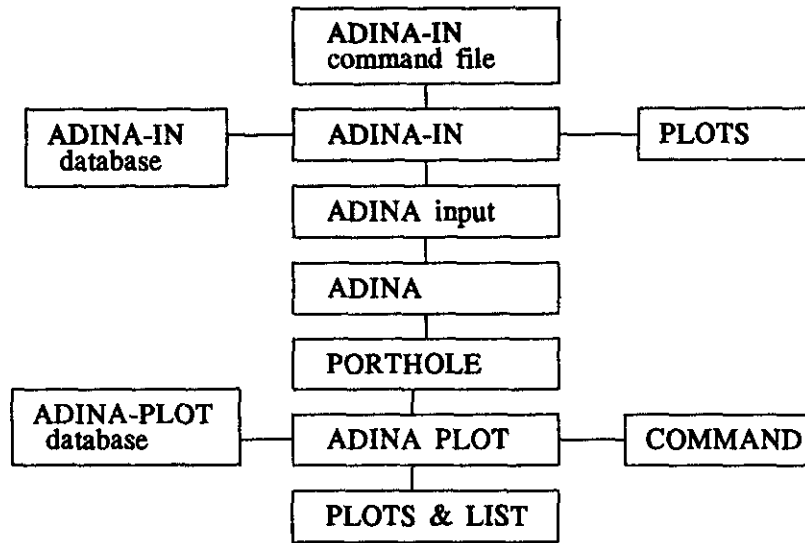


Fig. 2.1 Execution sequence of ADINA-IN, ADINA and ADINA-PLOT.

2.2 SNU-VEA (Seoul National University Visco-Elastic Analysis) 프로그램

본 프로그램은 서울대학교 자원공학과 암석역학연구실에서 개발되어 왔으며, 지금까지 지하자원 개발을 위한 갱도 및 채굴공동, 대규모 지하저장시설 등 각종 구조물에 대한 안정성 평가에 적용한 바가 있다. 또한 현지암반은 단층, 절리, 균열 등의 역학적 결함을 포함하고 있고, 불균질성, 이방성, 비선형성을 갖고 있기 때문에 이런 암석의 특성을 실제에 맞게 모델화하는데 노력하여 왔으며, 본프로그램은 암석이 갖는 시간의존성, 응력수준에 따른 비선형성, 그리고 굴착과정에 따른 응력재배치과정 등을 고려할 수 있는 특성을 갖고 있다.

탄성체의 변형은 시간에 무관한데 비하여 점탄성체의 변형은 시간의존성을 나타낸다. 즉 일정한 하중 하에서 변형은 시간의 경과에 따라 증가하는 크립현상(creep) 현상을 보인다. 일정한 응력하에서는 변형증가속도가 시간의 경과에 따라 감소하며, 이것을 근사적으로 Voigt-spring 형의 모델에 따른다고 가정하였다. 이 모델에서 시간의 경과에 따른 점탄성 암반의 변형곡선으로부터 총변형량 $\varepsilon(t)$ 는 (1)식과 같이 표현된다.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [1 + \alpha \{1 - \exp(-\beta t)\}] \quad (1)$$

여기서 ε_0 는 탄성변형, ε_c 는 크립변형을 나타내며, α 는 탄성변형에 대한 크립변형의 비이고 β 는 크립속도에 관한 계수이다.

암반에 분포한 응력이 증가하여 어느 수준에 도달하면 암반이 파괴되거나 소성변형을 일으키는데 본 프로그램은 Mohr-Coulomb 또는 Mohr-Griffith 의

파괴조건식을 사용한다. 암반의 하중이 증가하면 포아송비는 점차 증가하다가 어느 일정치 (0.4-0.5)에서 파괴가 일어나며, 탄성계수는 초기 탄성계수에 비하여 점차 감소하는 현상을 나타낸다. 여기서는 이런 비선형성을 Mohr 응력원과 파괴포락선으로부터 파괴의 접근정도에 따른 함수로 가정하여 고려하였다.

Fig. 2.2에서 암반내 어느 지점의 최대 및 최소 주응력을 각각 σ_1, σ_2 라 할때, Mohr 응력원의 중심 C 에서 파괴포락선까지의 거리를 D 라 하고 응력원에서 포락선까지의 거리를 d 라 하면 파괴접근도를 $R = d/D$ 로 정의한다. 만일 $R=1$ 인 경우는 암반이 정수압 상태로 가장 안전한 상태를 나타내고, $R=0$ 이라면 응력원이 파괴포락선에 접하여 암반이 파괴됨을 나타낸다. 여기서 파괴접근도 R을 보조함수를 이용하여 탄성계수와 포아송비가 암반내 응력크기의 변화에 따라 각각 (2)식과 같이 비선형적으로 변하는 것으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} E/E_0 &= R^n + (1 - R^n) E_f/E_0 \\ \nu/\nu_0 &= R^n + (1 - R^n) \nu_f/\nu_0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 E_0 와 E_f 는 각각 초기와 파괴시의 탄성계수이고, ν_0 와 ν_f 는 초기와 파괴시의 포아송비이다. 그리고 평형상태의 암반에 굴착이 이루어지면 새로운 자유면을 따라 응력이 개방되게 된다. 따라서 굴착경계면에서의 응력 개방효과를 얻기 위해서는 원래상태의 응력과 크기가 같고 부호가 반대인 응력을 굴착면에 작용하였다. 굴착경계면에 가해지는 응력은 절점에서의 등가 굴착 절점력 (Equivalent Nodal Force of Excavation)으로 환산되어 하중벡터에 추가된다.

본프로그램의 해석 방법은 먼저 초기의 응력분포를 계산한 다음 굴착에 의해서 발생한 등가굴착외력을 터널의 굴착면에 작용시켜 탄성응력값을 계산한다. 이 응력값에 따라 탄성계수와 포아송비를 변화시키고 등가굴착외력과 공동주위의 암반에 재배치된 응력이 평형에 이룰때 까지 강성행렬을 새로이 구성하면서 변위와 응력을 구하는 과정을 반복한다. 평형에 이르면 creep에 의한 변위를 계산한다. 이러한 과정을 직전 굴착단계의 값을 초기치로 하여 마지막 굴착단계까지 반복한다.

3. 2차원 해석에 의한 근사적인 3차원 막장진행효과의 고려

계측에 의하거나 막장의 진행을 고려한 3차원 해석에 의하면 터널굴착으로 인한 총변위량의 양상은 Fig. 3.1 에 나타낸 형태를 보인다. Fig. 3.1 의 곡선은 막장이 계측지점에서 충분히 멀어졌을 때의 변위, 즉 최종 변위를 단위 값으로 정규화 시킨 것이다. 이러한 변위곡선을 변위특성곡선이라 부른다. 막장의 거리에 따른 총변위의 발생 형태는 지반의 재료상수, 수직응력에 대한 수평응력의 크기 비, 터널단면의 형태에 따라 조금씩 다른 모습을 보이지만 터널의 수평 방향폭과 높이의 비가 크게 차이가 나지 않으면 Fig. 3.1 에 나타낸 형태에서 크게 벗어나지 않는 것으로 알려져 있다. 이 그림에서 보듯이 터널의 막장이 터널 직경의 약 2배 전후 범위 안에서

대부분의 변위가 발생함을 알 수 있다.

3.1 해석 방법

2차원 유한요소해석에서 요소망의 특정부분에 절점을 공유하도록 여러개의 요소를 중복하여 선언하여도 전체 강성행렬의 밴드폭은 변하지 않는다. 이러한 원리를 이용하여 터널굴착 예정단면에 해당하는 유한요소망의 부분에 몇개층의 요소망을 중복하여 선언한다. 이 때 이들 각층의 탄성계수는 원래 암반의 탄성계수 합과 같도록 조정한다(Fig. 3.2). 3 차원적인 막장의 진행은 굴착예정단면에 미리 선언된 이들 요소층들을 하나씩 제거해 가는 것으로 모델화 하며 마지막 요소층이 제거되는 시점을 터널굴착이 완료된것으로 간주한다. 이와 같은 해석방법을 이하에서는 다중요소법이라 부르기로 한다.

따라서 이 방법의 적용에 있어서 가장 중요한 점은 중복해서 선언한 각 요소층의 탄성계수 분배 비율을 어떻게 결정하는가이며, 이러한 탄성계수 분배곡선은 굴착과정을 고려한 3차원 변위해석 결과나 해석 대상터널과 유사한 조건을 갖는 터널의 변위계측결과에 의한 변위특성곡선을 바탕으로 시행착오적으로 2차원 다중요소해석을 실시하여 결정할 수 있다.

2차원 다중요소해석에 의한 응력해석 결과는 굴착과정을 고려한 3차원 해석과 정확히 일치한다고 볼 수 없지만 두 해석결과 나타나는 변위 특성곡선이 서로 근사하도록 탄성계수 분배곡선을 결정하므로 슛크리트나 록볼트 등에서 처럼 지보재에 발생하는 응력이 터널의 변위 양상에 큰 영향을 받는 경우, 요소층들이 제거되는 적당한 시점에 록볼트나 슛크리트 요소를 해석에 포함시키면 지보재에 걸리는 응력이나 축력을 비교적 정확히 예측할 수 있다고 판단된다.

3.2 3차원 해석에 의한 탄성계수 분배곡선의 결정

본 해석에서는 먼저 주어진 대상 터널에 대하여 굴착과정을 고려한 3차원 탄성해석을 실시하여 본 대상 터널의 경우에 대한 총변위 특성을 조사하였다. 그리고 이를 바탕으로 2차원 다중요소해석에 이용할 탄성계수 분배곡선을 결정하였다.

계산시간을 줄이기 위하여 Fig.3.3 과 같은 간단한 유한요소망을 구성하여 전단면 굴착방법에 의해 굴착이 진행된다고 가정하고 해석을 실시하였다. 모델은 터널의 높이가 약 8.2 m, 지표로부터의 심도가 22 m, 가로 50 m, 세로 70 m, 그리고 터널축방향 길이가 100 m 이다. 유한요소망을 구성하고 있는 3차원 블럭요소는 각 모서리에 절점을 갖는 8절점 요소이다. 모델의 상부면을 제외한 모든 측면 및 하부면을 구속하였으며 외력으로 자중이 작용하도록 하였다. 지반의 탄성계수는 $200,000 \text{ t/m}^2$, 포아송비는 0.3, 단위중량을 2.3 t/m^3 을 가정하고 해석을 수행하였다.

본 해석에서의 계측단면은 모델 중앙의 터널단면이며 해석이 진행되면서

터널굴착 예정단면의 요소는 ADINA 프로그램의 요소제거 기능을 이용하여 점차적으로 제거함으로써 막장의 진행효과를 모델화 하였다. 막장이 계측단면에 부근에 있을 때 급격한 변위의 변화가 발생하므로 계측단면 부근의 요소폭을 좁게하여 이 부분에서의 변위특성을 자세히 고찰할 수 있도록 요소망을 구성하였다.

해석결과 계측단면의 천단침하를 최종변위를 1로 하여 정규화 시킨 결과 Fig. 3.4 의 점선으로 나타낸 곡선을 얻었다. 이 곡선에서 보듯이 막장이 계측단면에 도달했을 때 총변위량의 약 33%가 발생함을 알 수 있으며, 막장이 계측단면을 지나 터널직경의 약 3배까지 진행하면 계측단면에서의 천단침하는 거의 최종 값에 도달함을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 3차원 해석에 대응되는 2차원 다중요소해석에 이용할 탄성계수분배곡선을 Fig. 3.5 의 실선으로 나타낸 곡선으로 정하였다. 이 곡선을 보면 본 해석터널과 같은 조건의 터널의 경우 2차원 다중요소 해석시 막장이 계측단면에 도달할 때까지 약 50%의 탄성계수 제거효과를 주어야 3차원 해석과 근사한 천단침하 특성을 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 물론 이 탄성계수분배곡선은 2차원 다중요소해석에 의한 천단침하 특성곡선을 시행착오적으로 3차원해석 결과와 비교함으로써 결정된 것이다. 이렇게 결정된 탄성계수분배곡선을 이용하여 2차원 다중요소해석을 수행한 결과 천단침하 특성곡선은 Fig.3.5 에 나타낸 것과 같이 3차원 해석결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

4. ADINA 프로그램에 의한 예제 터널 2차원 해석

4.1 해석모델의 구성

본 해석에서는 앞에서 설명한 다중요소법에 의하여 해석을 수행하기 위하여 Fig. 4.1 과 같은 2차원 모델을 구성하였다. 모델의 크기는 가로 방향이 50 m, 세로 방향이 70 m 이다. 터널은 지표 즉, 모델 상부경계로부터 22 m 깊이에 위치한다. 모델의 측면 및 하부면의 변위를 구속하고 자중이 외부 하중으로 작용하도록 하였다. 해석 대상터널이 위치한 지역은 지표로부터 10 m 깊이까지는 풍화토, 이로부터 20 m 깊이까지는 풍화암, 그 하부로 부터는 연암이 위치하고 있으므로 모델을 물성을 달리하는 세부분으로 나누어 구성하였다. 지보재로는 록볼트와 슛크리트만이 사용되는 것으로 가정하였다. 상반굴착 후 6개의 록볼트와 20 cm 두께의 슛크리트가 설치되며 하반굴착 시 2 개의 록볼트와 역시 20 cm 두께의 슛크리트가 설치되는 것으로 하여 해석을 하였다. 해석에 이용된 유한요소망은 Fig. 4.2 와 같다. 요소망을 구성하는 총 요소수는 197 개이고 총 절점수는 221 개이다. 슛크리트는 지반부분에 해당되는 요소처럼 4개의 절점을 갖는 평면변형을 요소로 모델화 하였으며 록볼트는 트러스 요소로 모델화 하였다. 지반은 Prager-Drucker 파괴조건을 따르는 탄소성 해석을 하였으며 해석에 이용된 지보재와 지반의 물성은 Table 4.1 와 같다.

Table 4.1 지반 및 보강재의 물성

	탄성계수	포아송비	단위중량	내부마찰각	점착력
단위	t/m ²	ν	t/m ³	(°)	t/m ²
풍화토	8,000	0.286	2.0	25	2.0
풍화암	100,000	0.231	2.2	35	5.0
연암	500,000	0.20	2.4	40	10.0
숏크리트	1,500,000	0.20			
록볼트	21,000,000	0.27	단면적 0.0005 m ²		

본 해석에서는 다중요소해석법을 단순화시켜 상반 및 하반이 각각 2단계에 걸쳐 굴착보강이 이루어지는 것으로 가정하였다. 즉, 터널굴착 예정단면의 상하반을 각각 2개층의 요소층으로 구성하였다. 각 층의 탄성계수는 본래 지반 탄성계수의 50% 씩을 부여하였다. 해석이 진행되면서 상하반 모두 50%의 탄성계수가 제거되고 다음단계에서 숏크리트 및 록볼트 요소를 포함시킨 후 나머지 50% 탄성계수가 제거되도록 해석을 수행하였다. 여기서 터널굴착 초기에 50%의 탄성계수를 제거시킨 것은 3장에서 설명한 탄성계수 분배곡선을 근거로 한 것이다. 따라서 본 해석은 다음과 같이 총 5단계의 해석과정을 거치게 된다.

- 1 단계 : 터널의 굴착이 시작되기전의 자중에 의한 초기응력이 계산된다.
그리고 이 초기응력은 다음 단계해석의 초기 응력조건으로 이용된다.
- 2 단계 : 상반부의 2개의 요소층 중 하나의 요소층이 제거된다.
- 3 단계 : 상반의 측벽에 6개의 록볼트 요소와 숏크리트 요소가 생성되고
나머지 50%의 탄성계수를 갖는 요소층이 제거된다.
- 4 단계 : 하반부의 2개의 요소층 중 하나의 요소층이 제거된다.
- 5 단계 : 마지막 단계로 하반부의 벽면에 2개의 록볼트와 숏크리트 요소가
생성되고 나머지 50%의 탄성계수를 갖는 요소층이 제거된다.

4.2 해석결과

5단계 다중요소 해석에 의한 지반의 변위 해석결과 나타난 터널측벽변위, 천단침하, 지표침하량을 Table 4.2에 나타내었다. 여기서 터널측벽변위는 S.L. 라인 약 1 m 상부에서의 수평방향변위를 나타낸 것이고 지표침하는 터널 직상부 지표에서의 변위를 나타낸 것이다. 측벽에서의 수평변위는 상반의 굴착보강 완료 시 약 0.6 mm의 미소한 변위를 보이며 하반 굴착보강 완료 시에는 상반굴착 시에 비하여 오히려 줄어들어 약 0.2 mm의 변위량을 보여주고 있다. 천단침하 및 지표침하는 상반 굴착보강 완료 시 각각 약

5.0, 2.4 mm 로 나타났으며 하반굴착이 끝났을 때 각각 약 5.3 mm, 2.8 mm 로 나타났다. 따라서 해석결과로 볼때 지표침하 및 천단침하량은 상반굴착시에 대부분이 발생됨을 보여준다.

Table 4.2 측벽, 천단 및 지표에서의 변위량 (단위 mm)

	측벽	천단침하	지표침하
상반굴착보강 완료시	0.61	4.93	2.42
하반굴착보강 완료시	0.20	5.34	2.75

Fig. 4.3 은 지표에서 터널중심축으로 부터의 거리에 따른 지표침하의 양상을 보여준다. 터널굴착으로 인한 지표에서의 침하는 터널축으로 부터 약 35 m 거리에 걸쳐 발생하고 있음을 볼 수 있으며 1 mm 이상 침하가 일어나는 범위는 약 15 m 이내임을 알 수 있다. Fig. 4.4 는 상반 및 하반 굴착완료 시에 나타나는 변위벡터를 도시한 것이다. 터널의 크라운 부분에서 큰 변위량을 보이며 변위방향은 대체로 크라운 부분에서는 아래로 향하며 하반부분에서는 직상부 방향을 향하고 있다. 측벽부에서는 터널 안쪽방향보다는 오히려 바깥쪽으로 향하는 특징이 있다.

Fig. 4.5 는 상반 및 하반 굴착완료시의 록볼트에 걸리는 축력을 나타낸다. 최대 축하중은 상반굴착시 3.4 톤, 하반굴착시 3.6 톤이 발생하였다. Fig. 4.6 는 슛크리트에 나타나는 응력으로 상반 굴착시 480 t/m²에서 하반 굴착후 400 t/m² 으로 되었으며, 하반굴착시 추가되는 지보재의 지보하중은 상반굴착과 함께 설치한 지보재에 비하면 상당히 낮은 하중이 작용함을 보였다.

5. SNU-VEA 프로그램에 의한 해석

5.1 해석방법

앞에서 논한 ADINA 프로그램에 의한 해석과 함께 점탄성 해석 프로그램에 의한 에제터널의 응력해석을 하여 그결과를 비교 검토하였다. 상기한 다중요소법 해석에서는 탄성계수를 제거하면서 굴착진행과정을 시뮬레이션 하였으나 본 해석에서는 탄성계수를 줄여 나가는 대신 굴착경계면의 응력을 같은 비율로 제거하는 방법을 사용하였다. 해석 모형 및 굴착단계는 ADINA 프로그램해석과 동일하게 하였다. 굴착단계는 5단계로 각 단계에 소요되는 굴착일수는 1단계 및 2단계는 0, 3단계이후에는 각 단계별 10 일씩 소요된다고 가정하였다. 시간경과에 따르는 암반 변형의 증가는 탄성변형의 1%로 하였으며, 변형증가율 β 는 5/day 로 하였다. 기타의 여러 물성치는 ADINA 해석과 동일한 값으로 입력하여 두 해석결과를 비교하였다.

5.2 해석 결과

굴착 진행과정에 따라 굴착 경계면의 응력을 개방하여 해석한 결과 암반의 변위분포가 Fig. 5.1과 5.2 에 나타나 있다. 상반을 굴착하고 보강했을 때 천반에서 4.9 mm의 변위가 발생한다. 또 바닥에서의 변위는 2.4 mm, 측벽변위는 2.6 mm 가 발생하였다. 지표에서의 침하는 터널 직상부에서 최대치 1.95 mm 로 나타났다. 하반을 굴착하고 보강했을때 상반굴착후에 비해 현저한 변위 증가를 보기 어려운데, 이는 하반 굴착시 굴착의 예정면 주위의 응력이 상반 굴착과 함께 대부분이 개방되어 굴착외력의 크기가 상반굴착시에 비해 매우 적기 때문이다. 전체적인 변위양상은 ADINA 해석과 유사한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 하반 굴착시 지표침하와 천반 침하는 큰 변화가 없었으며 하반변위는 1.3 mm 가 발생하였다.

록볼트에 작용하는 축하중의 분포는 Fig. 5.2 와 같으며, 상반굴착시 천반에서 최대 4.0 톤이 발생하였다. 천반에 비해 측벽에서는 상대적으로 낮은 하중이 작용하였으며, 하반 굴착 후에 큰 변화를 보이지 않는다. 슛크리트의 응력은 Fig. 5.4에 나타나 있으며, 천반에서 80 t/m², 측벽에서 354 t/m² 가 발생하였다. 하반 굴착시 추가된 록볼트 또는 슛크리트에는 상당히 적은양의 하중이 걸린 것을 확인할 수 있다. 본 프로그램의 비교를 위해 Creep 변형특성과 비선형 특성을 약간 축소하여 해석하였으나 입력자료의 선택이 적절하다면 현장의 상태를 보다 정확히 해석할 수 있을 것이다. ADINA 해석의 결과와 비교해 보면 가장 큰 차이는 하반 굴착 후에 터널 상부의 변형거동이 큰 변동을 보이지 않는다는 것으로 그 원인은 굴착과정에 대한 시뮬레이션 방법의 차이 때문이라고 생각된다.

6. 결론

본 해석에서는 터널단면 상에서 2차원 평면 변형을 해석을 위한 방법으로 ADINA 프로그램과 점탄성 해석 프로그램을 이용하였다. 굴착의 진행과정을 시뮬레이션하기 위하여 ADINA 프로그램의 요소 생성과 제거 원리를 이용하여 굴착 진행의 3차원 해석에 따르는 변위특성 분포를 먼저 구하였다. 이를 바탕으로 다중요소 해석을 하였는데, 굴착예정 부분의 탄성계수를 다중요소에 분배하고 이들 요소를 차례로 제거하는 방법을 사용하였다. 굴착면이 계측점 직하부에 도달했을때 계측변위는 총변위량의 33 % 정도이고 다중요소법에서 같은 변위 특성곡선을 얻기위해 굴착되는 부분의 탄성계수가 50 % 감소해야 함을 알수 있었다.

예제 터널에 대하여 5단계 굴착 과정에 따라 탄소성 해석을 한 결과 암반의 최종 변위는 천반에서 최대 5.3 mm 가 발생하였고 슛크리트에 작용하는 응력은 약 400 t/m², 록볼트 축하중은 3.6 톤이 발생하였다.

굴착부분의 탄성계수를 줄여가는 방법 대신 굴착경계면의 응력을 같은 비율로 개방하는 방법을 사용하여 해석한 결과 암반에 분포하는 변위와 응력은 매우 유사한 양상을 보여주었다. 천반에서 발생한 최대의 변위는 4.9 mm 인데, 상반굴착시 대부분의 변위가 발생하고 하반굴착에 따른 변위증가 및 지표하중의 증가량은 미약하였다.

본 해석 프로그램에서 암반의 비선형변형특성과 Creep 특성에 따른 입력자료의 선택이 적절하고, 굴착진행과정에서 탄성계수 분배비율을 결정함에 있어 암반의 변위에 큰 영향을 미치는 지보재의 응력을 고려한다면 현장에 대한 보다 정확한 해석과 예측이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Lee Chung-In & Park, Yeon-Joon, 1985, A Numerical Analysis of Underground Opening, Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, Vol. 2, PP. 1085-1093.
2. Lee, Chung-In, Kim, Chee-Wan, Sun, Yong, 1986, The effect of Pillar width on stress distribution around underground Caverns in Visco-elastic Rock, Proc. Int. Sym. on Large Rock Cavern, Finland.
3. Lee, C.I., Kim, J.D., Jang H.G., Im J.O., 1988, Stability Analysis of a Deep Tunnel Reinforcement by Rock bolt, Proc., Int. sym. Tunneling for Water Resources & Power Project.
4. 이상필, 이정인, 불연속 암반내 공동 주위의 응력 및 변형거동에 관한 수치해석, 한국자원공학회지, 제27권 제4호, pp.268-282, 1990.
4. Van Dillen, D., R.W. Fellner & B. Dendrou (1979), " A two-dimensional finite element technique for modeling rock / Structure interaction of a lined underground opening", 20 th Symposium on Rock Mechanics, pp.251-258.
5. ADINA - A finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis, Report AE84-1, ADINA Eng. AB and ADINA Eng.Inc., 1984
6. P.T. Brown and J.R. Booker, "Finite element analysis of excavation", Computer and Geotechnics 1, pp.207-220, 1985

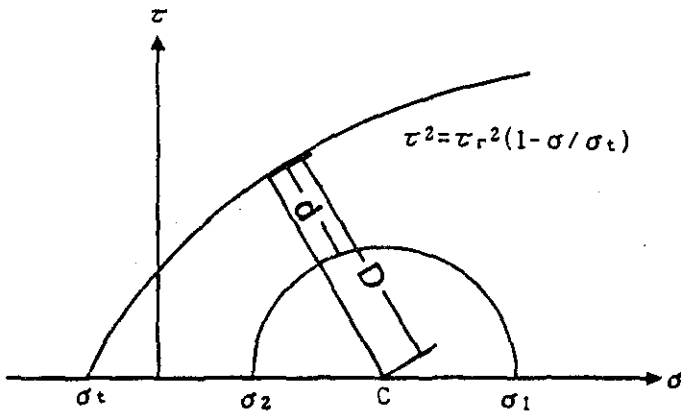


Fig. 2.2 Mohr stress circle and Failure envelope

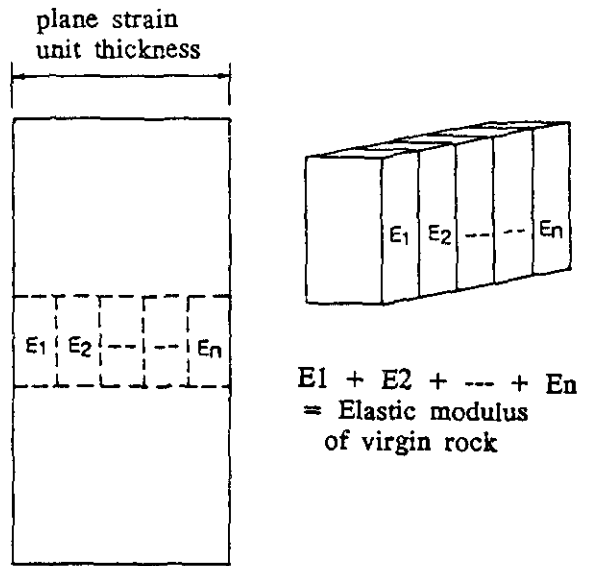


Fig. 3.2 Principle of multiple layered element method.

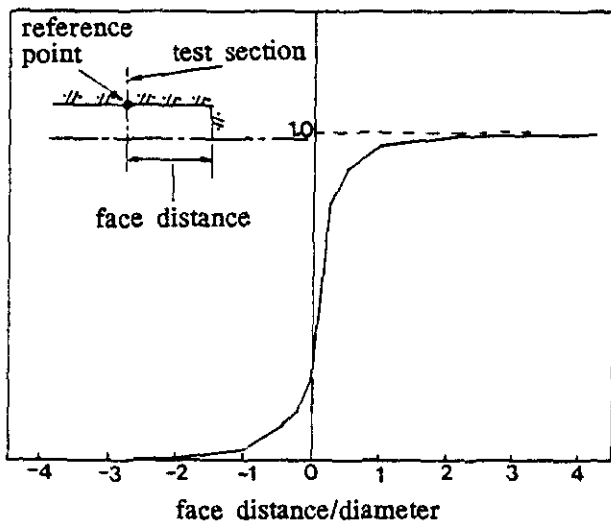


Fig. 3.1 Displacement history during tunnel excavation.

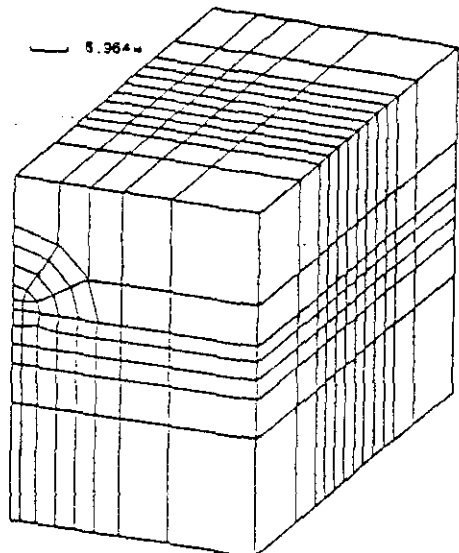


Fig. 3.3 3-dim finite element mesh.

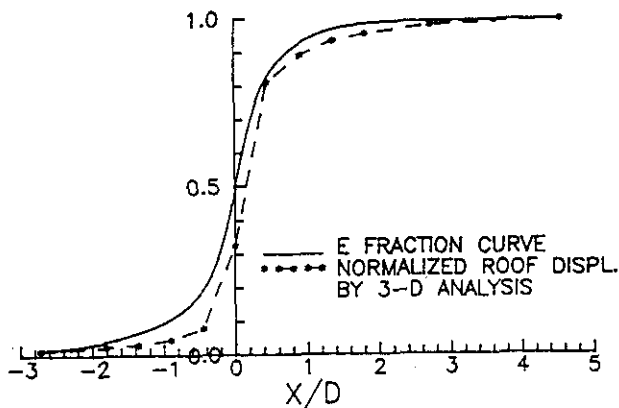


Fig. 3.4 Normalized curves for roof lowering displacement and stiffness in 3-dim. analysis.

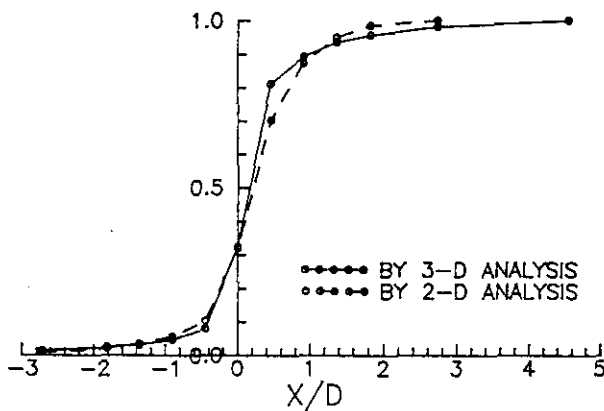


Fig. 3.5 Comparison of normalized curves in 3-dim. and multiple layered element analysis.

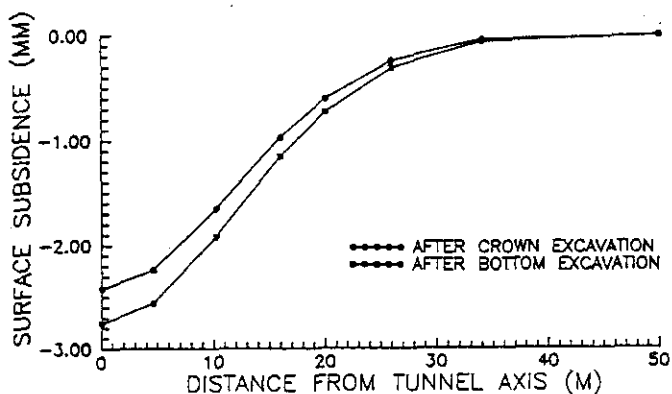


Fig. 4.3 Surface Subsidence.

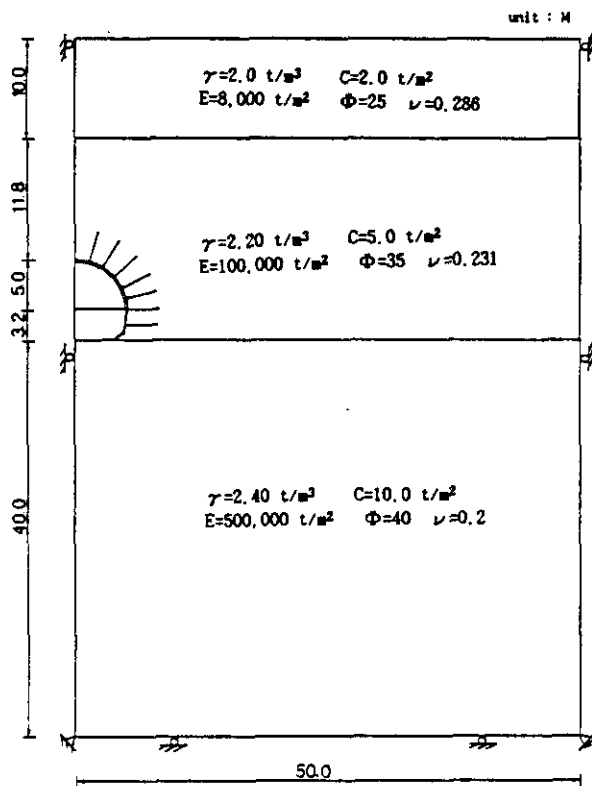


Fig. 4.1 Model Configuration

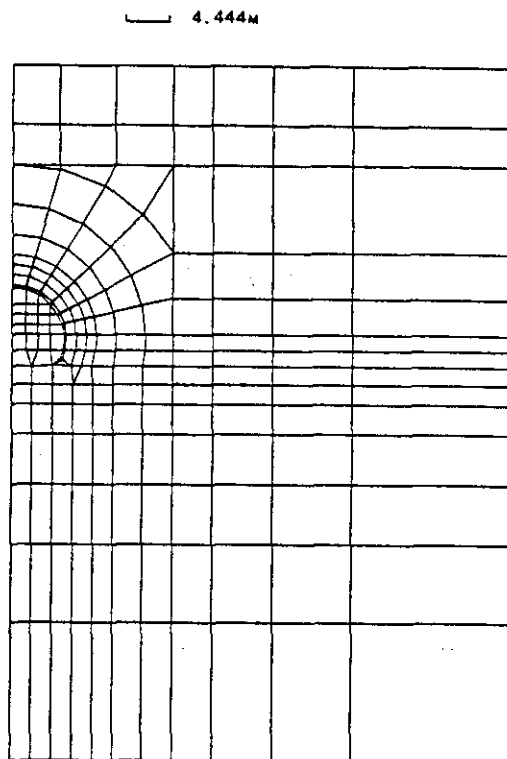


Fig. 4.2 Finite element mesh.

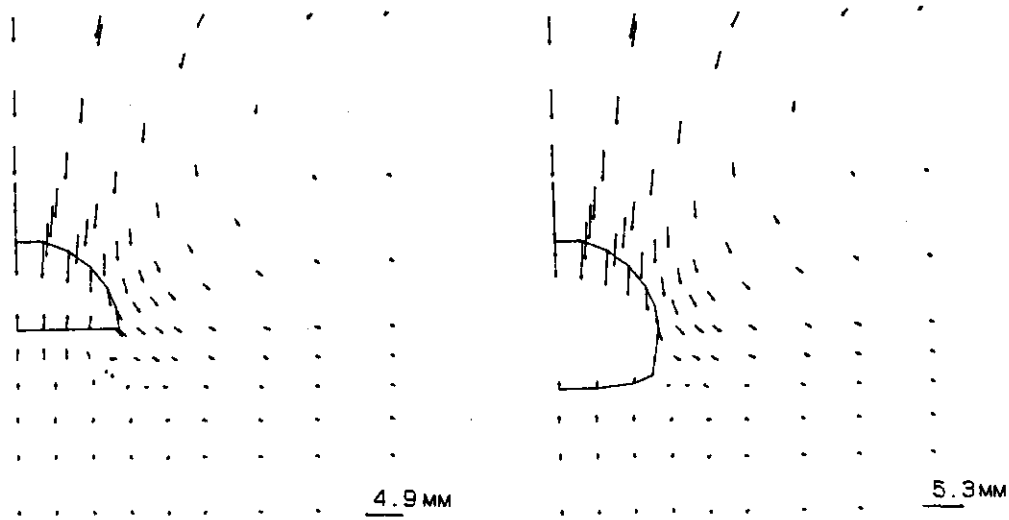


Fig. 4.4 Displacement vectors. (a) crown excavation (b) bottom excavation

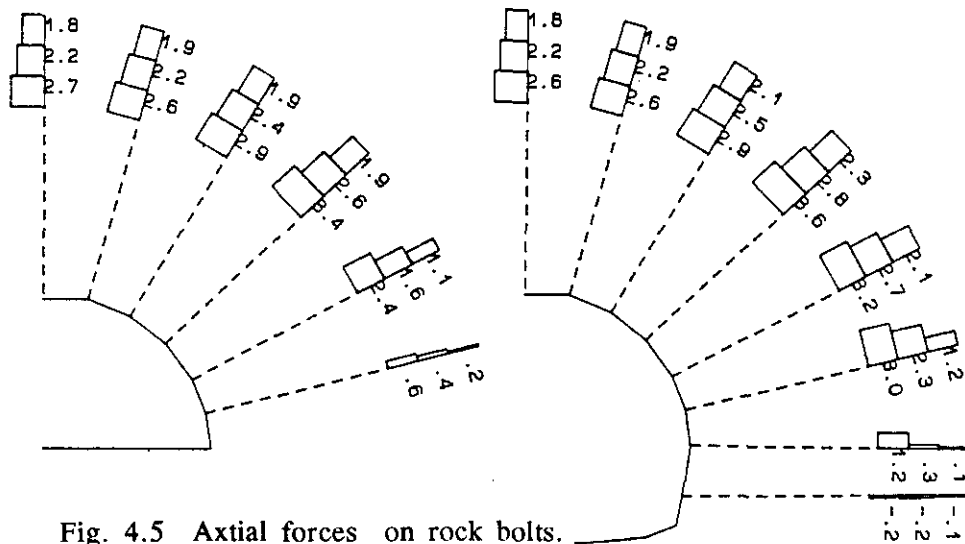


Fig. 4.5 Axial forces on rock bolts.
(a) crown excavation (b) bottom excavation

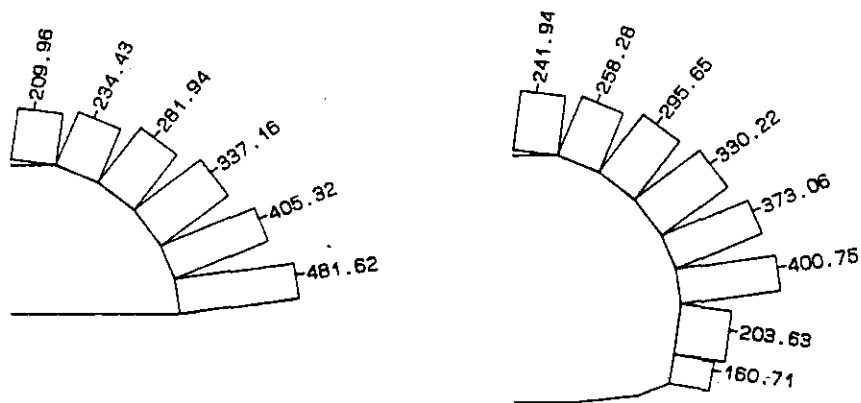


Fig. 4.6 Stresses in Shotcrete (a) crown excavation (b) bottom excavation

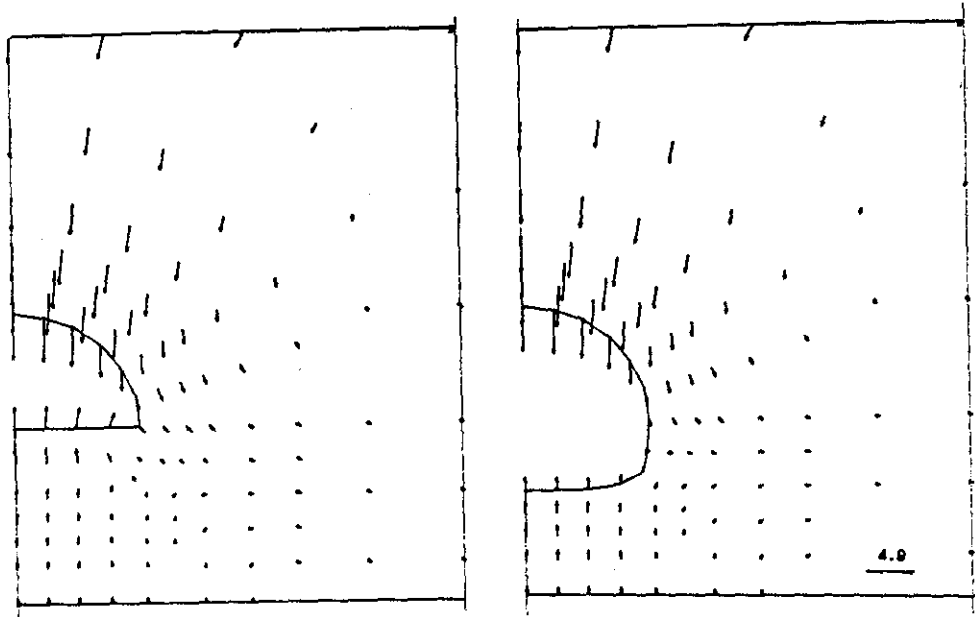


Fig. 5.1 Displacement vectors. (a) crown excavation (b) bottom excavation

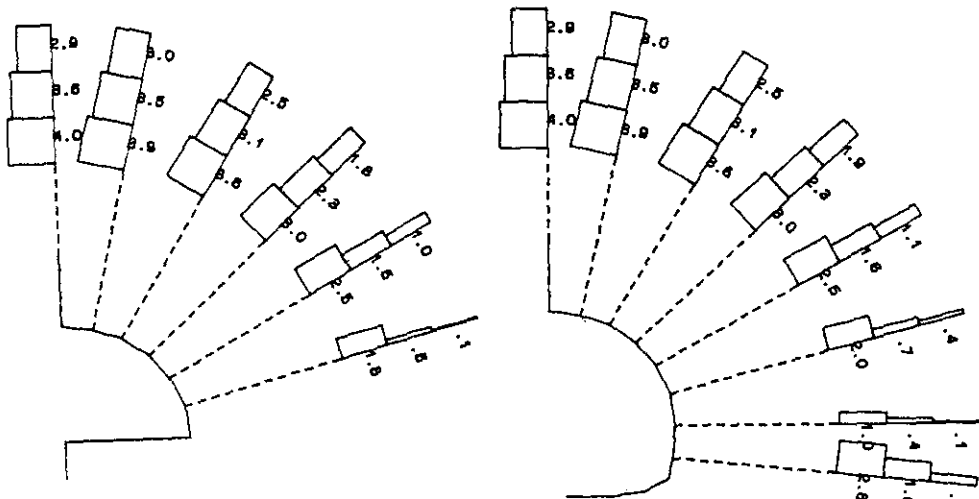


Fig. 5.2 Axial forces on rock bolts. (a) crown excavation (b) bottom excavation

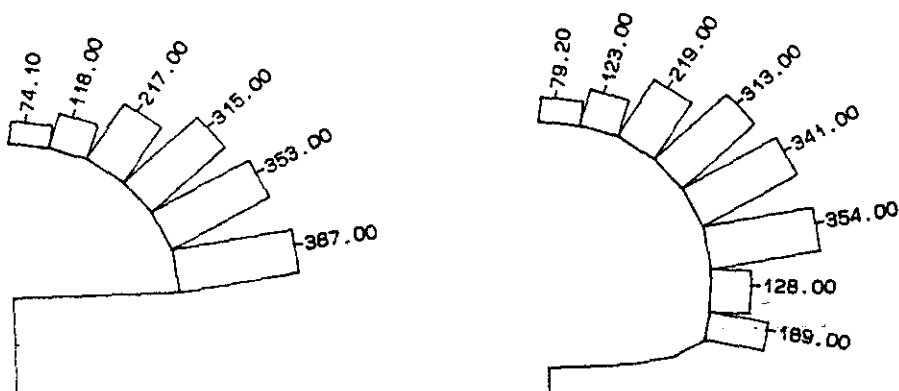


Fig. 5.3 Stresses in shotcrete (a) crown excavation (b) bottom excavation