한국전산구조공학회
1992년도 봄학술발표회 논문집

지반특성곡선 개념을 이용한 터널굴착 거동해석

Ground Deformation Analysis of Tunnel Excavation Based on the Ground Characteristic Line Concept

손준익*1 정하익*2
Sohn, Joonik Jeong, Haik

Abstract

The ground deformation due to the tunnel excavation is dependent on various factors such as ground condition, geometry of the tunnel, excavation method, installation of support members, construction condition of each excavation stage, etc. And the distance from the facing effects significantly the stress conditions of the supported and unsupported ground due to the 3-dimensional structural nature of the excavated tunnel.

The concept of ground characteristic line has been applied to properly consider the loading condition given by staged tunnel excavation so that the imaginary supporting pressure is applied against the surface of excavated ground. Discussions on the results of the performed finite element analysis were mainly made with respect to the ground settlement, tunnel displacement, earth pressure, stress mobilized in supporting members.

1. 서론

터널굴착에 따른 주변지반의 거동은 지반조건, 터널의 기하학적 형상, 굴착 방법, 지보재 설치에 따른 굴착단계별 시공조건 등의 다양한 요인들에 의하여 좌우된다. 또한 터널 구조물은 터널 단면방향과 터널 굴진방향으로 3차원적인 구조임을 감안할 때 굴착부에서 막장까지의 거리는 굴착부의 지반응력 상태에 상당한 영향을 주게 된다.

따라서 본 연구에서는 터널굴착 단계별 하중조건을 적절히 반영할 수 있도록 지반특성곡선 개념을 적용하여 터널굴착면 내부에 가상 지지압력을 재하하여 지반침하, 터널변위, 지중응력, 지보재 응력 등의 해석결과를 분석하였다.

*1 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원
*2 정회원, " 연 구 원

2. 지반특성곡선 개념

터널굴착에 따른 주변지반과 지보재에 작용하는 응력과 변위는 주변지반의 물성과 현장 응력상태에 의하여 좌우될 뿐만 아니라 지보재의 강성과 지보재의 설치 경과시간, 터널 막장에서부터의 떨어진 거리 등에도 영향을 받는다. 이와같은 영향을 잘 반영하여 주는 것이 굴착지반을 지지하는 가상 내부지지압력과 내공변위와의 관계를 나타내는 소위 지반특성곡선(ground characteristic line) 혹은 지지반응곡선(support reaction line)의 개념이다(Ward, 1978 : Brown et al., 1983).

2.1 평면 변형률 조건

그림 1은 Ladanyi의 특정터널에 대한 해석결과를 나타내고 있다(Ward, 1978). 그림 내의 두 곡선 중에서 실선은 상대 내공변위(u_t/r_{to})에 따른 상대지지압력(P_t/P_o)를 나타내며, 점선은 그에 대응하는 파쇄영역범위($r_{bo}-r_{to})/r_{to}$를 나타내고 있다. 단기 특성곡선의 경우 P_t/P_o = 0이 되는 상대내공변위는 약 1 %에 해당되며 지보재가 설치되기 전에 지반내의 응력은 평형상태에 도달된다. 단기 특성곡선에서 P_t/P_o = 0인 지점에서 지보재가 설치된다고 할 때 장기간의 지반변형에 따라 지보재에는 지반과 지보재의 방사방향 변위가 같아질 때까지 방사방향의 압력이 증가하여 평형상태에 도달한다. 지보재에 발생되는 방사방향의 압력은 지보재와 주변지반의 강성에 의해 좌우되지만 이 경우에는 초기 지반응력 Po의 약 9 %를 나타내고 있다. 또한 지보재의 항복응력이 작은 경우는 그림에서와 같이 장기간의 지반변형을 감안함에 따라 보다 큰 내공변위에서 평형상태에 이른다.

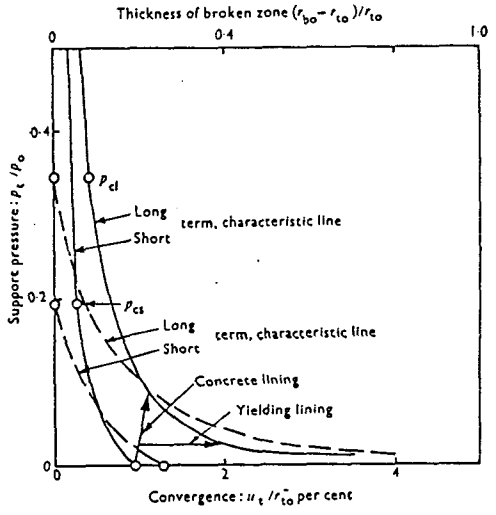


그림 1 터널내공변위에 따른 굴착부 지지응력 개념(Labdanyi, 1974)

2.2 터널 막장에 의한 3차원적 지지조건

터널굴착에 있어서 막장과 인접한 부근에서는 막장으로 인한 지지영향에 의하여 상당량의 변위가 억제된다. 앞에서의 평면변형률 조건은 굴착단면이 막장에서 충분히 멀리 떨어진 곳에서만 적용이 가능하다.

앞에서도 언급한 바와 같이 터널굴진은 지반굴착과 지보재설치의 공정이 교대로 병행되며 계속되게 된다. 따라서 지보재가 터널막장 근처에 설치되면 터널굴진이 계속됨에 따라 터널막장부에 지지되고 있던 하중의 일부가 지보재에 전달되게 된다. 그림 2는 지보재 설치에 의한 변위형태 및 내부지지압력분포 양을 나타내 주고 있다. 윗 그림에서 실선과 점선은 지보재가 설치되지 않은 경우와 설치된 경우를 각각 나타낸다. 또한 F는 상대변위비로 터널 축방향을 따라 발생하는 굴착단면의 변위를 평면변형율 조건에서의 변위로 나눈 값이다.

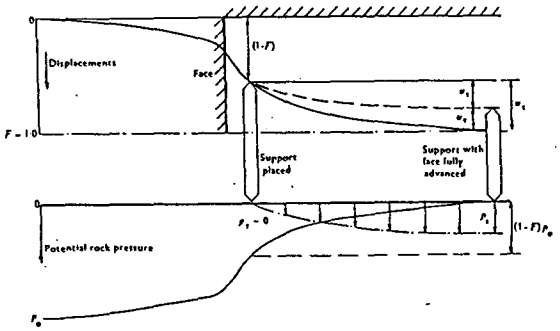


그림 2 지보재의 설치위치에 따라 원형터널 굴착부에 발생하는 지반변위형태와 지반 및 지보재에 작용하는 압력분포 형태(Ward, 1978)

터널막장 부근 굴착부에서의 지반 및 지보재에 작용하는 압력 분포형태를 살펴보면 P_o의 최대치는 막장 뒷편 먼 부근 (F = 0인 지점), P_o의 최소치 (P_o = 0)는 막장으로부터 앞쪽 먼 부근 (F = 1인 지점)에서 각각 나타나고 있고, 윗 그림에서 보인 변위변화 형태와 비교하여 볼 때 거울영상(mirror image)에 해당됨을 알 수 있다. 또한 지보재에 작용하는 압력(P_s)의 변화형태를 살펴보면 P = (1 - F) P_o 지점에서는 P_s = 0이며, 지보재가 충분히 멀리 떨어져 있을 경우 (F = 0 지점)에는 P_s는 최대치를 나타냄을 알 수 있다. P_s의 산출식은 다음과 같다.

$$\frac{P_s}{P_o} = \frac{K_s\,(1 - F)}{K_s + 2G_r} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

여기에서 Ks는 지보재의 강성을 나타내는 매개변수, Gr은 지반의 전단변형계수 이다.

3. 수치해석을 위한 이상화 및 가정조건

3.1 유한요소망과 경계조건

본 사례연구에서는 터널단면 방향에 대한 굴착단계별 터널 및 주변지반의 응력-변형해석을 위하여 그림 3과 같이 유한요소망을 작성하였으며 요소의 양단경계면 및 하부경계면은 수직 및 수평방향으로만 변위를 일으키는 roller로 가정하였다. 지반의 거동은 초기응력조건을 지정하였으며 요소의 단위중량과 위치를 고려하여 산정하였다.

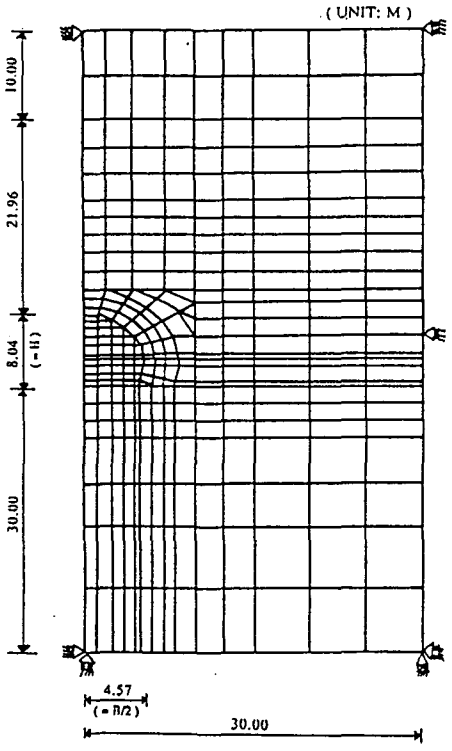


그림 3 터널 해석 단면의 유한요소망

3.2 지반조건 및 재료 물성치 결정

지반의 거동 특성은 선형 등방 탄성 모델을 사용하였으며 물성치는 표 1에 나타낸 바와 같이 문제에서 주어진 값을 그대로 적용하였다. 지보재는 탄소성 모델에 의한 beam 요소로 모델링하였으며 이 모델의 응력-변형율 관계곡선은 그림 4와 같다. 지보재의 파괴는 극한 변형율 ε_{ult}에서 발생하며, 항복과 파괴는 축력에만 의존하도록 되어있다. 재료가 소성범위에 있을 때의 휨강성은 소성계수 E_p 만으로 결정된다. 록볼트는 설치간격을 고려하여 물성치를 산정하였다. soft shotcrete와 hard shotcrete의 항복응력 Y는 하급 및 상급 콘크리트의 물성치를 각각 사용하였다.

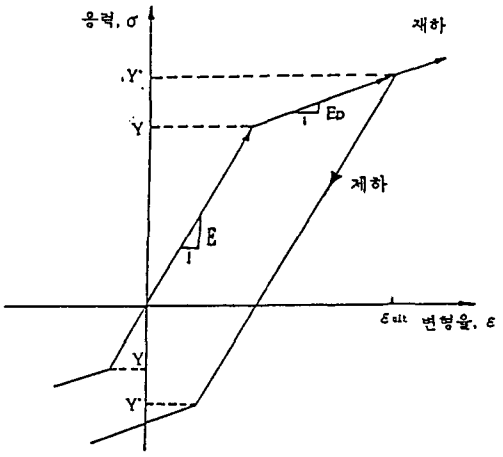


그림 4 지보재의 응력-변형율 관계곡선

3.3 시공단계별 해석조건

터널시공은 크게 굴착공과 지보공의 두가지 공정으로 구분할 수 있다. 굴착공은 터널단면을 상반, 하반, 인버트로 분할하여 시행한 것으로 하였으며 지보공은 반단면 굴착후 상반과 하반부에 교대로 시행된다. 이와같이 터널단면의 상반, 하반, 인버트의 굴착과 지보재의 설치는 같은 시점에서 시공되는 것이 아니기 때문에 구조적으로는 한 단면에서 일체감을 유지하고 있으나 역학적으로는 시공단계별로 굴착조건을 고려할 경우 응력조건은 일체감을 유지할 수 없다.

시간 비종속적 모델의 수치해석에 있어서는 굴착이 완료된 순간 지반응력은 평형상태에 도달하기 때문에 이어서 설치되는 지보재에는 다음 굴착 전까지 더 이상의 하중이 작용하게 되지 않는다. 그러나 현실적으로는 앞에서 언급한 지반특성곡선 개념에서와 같이 지보재에는 굴착지반에 한시적으로 지지되고 있던 하중이

표 1 지반 및 지보재의 물성치

재 료	물 성 치		
풍화토	$E = 8,000(t/m^2)$,	$\nu = 0.286$,	$\gamma = 2.0t/m^3$
풍화암	$E = 100,000(t/m^2)$,	$\nu = 0.231$,	$\gamma = 2.2t/m^3$
연 암	$E = 500,000(t/m^2)$,	$\nu = 0.200$,	$\gamma = 2.4t/m^3$
1차 숏크리트 (soft shot.)	$E = 500,000(t/m^2)$, $A = 0.05(m^2)$	$Ep = 140,600(t/m^2)$, $I = 1.04 \times 10^{-7}(m^4)$	$Y = 1,400(t/m^2)$, $\varepsilon_{ult} = 0.003$
2/3차 숏크리트 (hard shot.)	$E = 1,500,000(t/m^2)$, $A = 0.15(m^2)$	$Ep = 351,500(t/m^2)$, $I = 2.81 \times 10^{-6}(m^4)$	$Y = 2,800(t/m^2)$ $\varepsilon_{ult} = 0.003$
록 볼트	$E = 21,000,000(t/m^2)$, $A = 0.0005(m^2)$	$Ep = 7,029,500(t/m^2)$, $I = 1.6 \times 10^{-8}(m^4)$	$Y = 70,300(t/m^2)$, $\varepsilon_{ult} = 0.15$

지보재가 설치됨에 따라 지보재에 전달되게 된다. 따라서 본 해석에서는 이와같이 굴착부에서 형성되는 굴착단계별 지반응력 경계조건을 모델링하기 위하여 터널 내부에 작용하는 P_i를 $P_i = \alpha P_o$로 α의 수치를 변화시키며 표 2에서와 같이 단계별로 지정하였다. 여기에서 P_o는 원지반 응력으로 굴착지점에 작용하는 X, Y, Z 방향의 연직응력을 평균한 값으로 하였다.

4. 해석결과 분석

수치해석은 내부지지압력 P_i의 크기를 $P_i/P_o = \alpha = 0.09$인 경우를 표준조건으로 간주하여 상반, 하반, 인버트 굴착단계인 1, 4, 7단계를 중심으로 그 해석결과를 분석하였다. 또한 P_i의 크기에 따른 지반거동 반응을 비교하기 위하여 $P_i/P_o = \alpha = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$이 되도록 P_i의 크기를 변화시켜 표 2에서와 같은 시공단계별 해석을 실시하였다. P_i/P_o비가 다른 조건에 대하여는 굴착 최종단계인 7단계에서의 해석결과를 비교하므로써 가상 내부지지압력 Pi변화에 따라 영향을 받는 터널주변지반과 지보재의 거동특성에 관하여 분석하였다.

4.1 지반침하

지반침하는 지표침하와 지중침하를 대상으로 분석하였으며 분석 위치는 지표 아래 10 m, 20 m, 30 m 지점으로 하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 지표에서 터널방향으로 깊이가 커짐에 따라 지반침하량은 증가하며 지반침하 횡방향 영향범위는 감소함을 알 수 있다. 4단계와 7단계에서의 지반침하량은 차이가 거의 없고 그림에서는 중복되어 표기되었다. 즉 하반굴착 이후의 지반침하량은 매우 미소함을 알 수 있다.

지반침하량 해석결과의 타당성을 검토하기 위하여 다음의 Brand-Brenner에 의하여 제시된 지표-천단침하의 상관관계식(한전기술연구원, 1989)을 이용하여 계산된 값과 비교하여 보았다.

$$S_{max} / S_c = (D/h_o)^{0.8} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

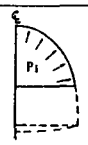
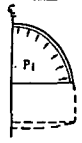
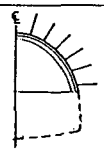
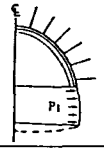
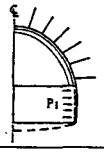
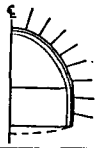
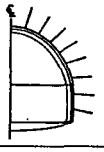
여기에서 S_{max} = 최대 지표침하; S_c = 천단침하;
D = 터널직경; h_o = 터널깊이

수치해석 결과는 S_{max} = 4.02 mm, S_c = 9.35 mm이며, 이들의 비는 $S_{max}/S_c = 0.43$이 된다. 한편 D = 9.14 m, 터널깊이 h_o는 상부지반의 평균 단위중량을 고려하여 h_o = 31.1 m로 간주할 경우 $(D/h_o)^{0.8} = 0.375$가 되며 상기식의 관계를 근사하게 만족하고 있다.

4.2 터널변위

천단침하량 δ_c는 그림 6(a)에서 나타난 바와 같이 굴착단계가 진행됨에 따라 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 내부 지지압력 P_i가 커짐에 따라 천단침하 δ_c는 감소하는 경향을 보이고 있어 P_i증가로 인

표 2 시공단계별 해석조건

해석단계	시공조건 / 내부지지압력	터널단면 형상
0	초기단계 $P_i = 0$	
1	상반굴착 $P_i = \alpha P_o$ $\alpha = 0.09$	
2	Soft Shotcrete 설치 $P_i = 0.5\alpha P_o$ $\alpha = 0.09$	
3	Hard Shotcrete + Rock Bolt 설치 $P_i = 0$	
4	하반굴착 $P_i = \alpha P_o$ $\alpha = 0.09$	
5	Soft Shotcrete 설치 $P_i = 0.5\alpha P_o$ $\alpha = 0.09$	
6	Hard Shotcrete + Rock Bolt 설치 $P_i = 0$	
7	인버트 굴착 $P_i = 0$	

하여 굴착부 지반변형을 억제하기 위한 지보재의 하중 분담률이 증가하고 있음을 알 수 있다. 4단계 이후 즉 하반굴착완료 시점 이후부터는 천단침하량의 증가 추세가 현저하게 둔화되어 더 이상의 천단침하는 발생하지

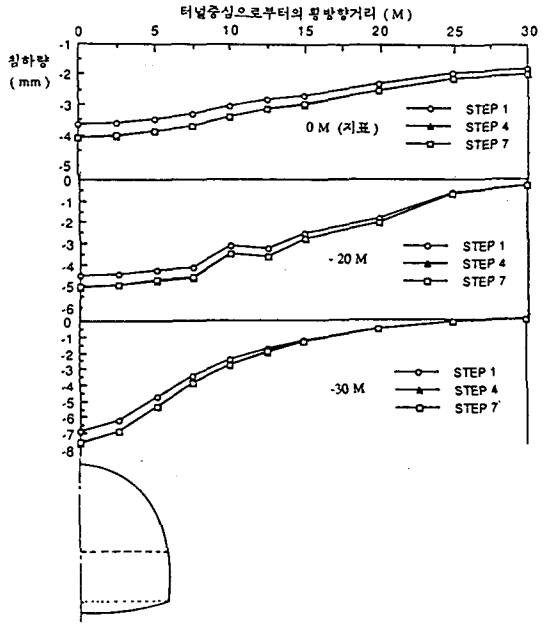
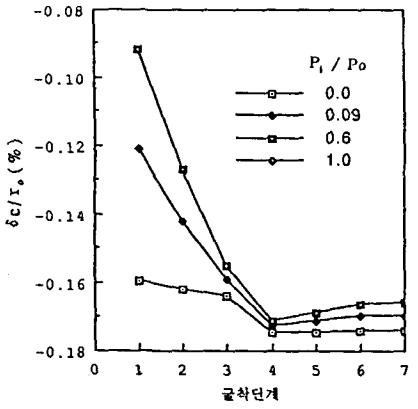


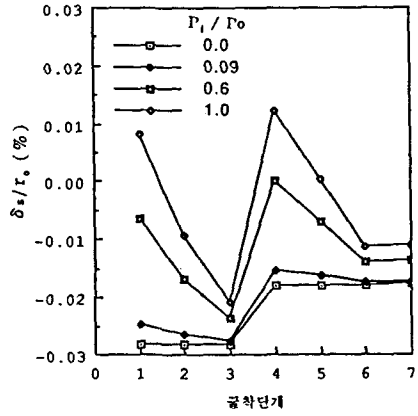
그림 5 지표 및 지중침하 곡선

않고 있으며 오히려 약간의 감소량을 나타내고 있다. 이 감소량은 매우 작은 양으로 무시할 정도이며 내부지지압력 P_i의 작용시점과 크기에 의해서도 영향을 받을 수 있다. δ_c의 마이너스 수치는 변위가 아랫방향으로 발생됨을 의미한다.

내공변위량 δ_s의 해석수치는 spring line에서 30cm 상부에 위치하는 지점을 대상으로 그림 6(b)에 도시하였다. 그림에서 보이듯이 내공변위량 δ_s는 3단계 굴착단계까지 즉 상반굴착부터 시작하여 상반 록볼트 시공시까지는 계속 증가하는 추세를 나타내고 있으며 하반굴착단계(4단계)에서 다시 급격한 감소량을 보인 후 하반 숏크리트 타설 및 록볼트 설치시 까지 다시 계속 증가하는 추세를 보인다. 마지막 인버트 굴착단계(7단계)에서는 거의 변위량에 차이가 없다. 천단침하량의 경우와 마찬가지로 내부지지압력 P_i가 증가함에 따라 지보재의 하중부담이 점차 증가하여 내공변위량도 역시 감소하고 있음을 보이고 있다. δ_c의 마이너스 수치는 변위가 터널중심을 향하여 안으로 발생됨을 의미한다.



(a) 천단침하



(b) 내공변위(터널 SL 상부 30 cm 위치)

그림 6 굴착단계별 터널변위 변화 추이

4.3 지중응력

굴착후 발생된 지중응력과 원지반 응력과의 상대적 차이를 비교하고 내부지지압력 P_i 변화에 따른 지중응력의 분포상황을 분석하기 위하여 각 P_i 조건별 응력 해석결과를 그림 7에 도시하였다. 터널 SL부근에서는 굴착후에 발생된 수직, 수평방향의 지중응력(σ_v, $\sigma_h)_{SL}$을 원지반 응력(σ_{vo}, $\sigma_{ho})_{SL}$ 수치로 각각 나눈 상대비를 도시하였고, 터널 천단부에 대하여는 굴착후의 지중응력(σ_v, $\sigma_h)_{crest}$을 천단부 지점에서의 원지반 응력(σ_{vo}, $\sigma_{ho})_{crest}$으로 나눈 상대비를 도시하였다.

그림 7(a)에서와 같이 터널 SL부근에서 나타나는 σ_v의 분포는 최대치가 d/r_o = 0 부근에서 원지반 응력 σ_{vo}의 약 3배를 나타내고 있고 d/r_o = 2 지점까지 계속 감소하는 경향을 보이며 d/r_o = 2 이상되는 지점에서는 큰 차이가 없다. 또한 SL 부근에서의 σ_h의 분포는 d/r_o = 0 부근에서 최소치에 가깝고 d/r_o = 2~3부근에서 원지반 응력과 비슷한 수준을 나타내며 감소하고 있다.

그림 7(b)에서는 원지반 응력의 분포와 비교할 때 σ_v는 천단부 근처에서 매우 작은 수치를 기록하고 계속 증가하여 h/r_o = 2인 지점 부근에서는 원지반과 같은 수준의 응력을 나타내며 더 상부로 올라갈 수록 원지반 토압보다 약간 증가하고 있으나 큰 차이는 없다. 반면에 σ_h의 분포형태는 σ_v와는 매우 다르다. 역시 천단부에서는 매우 작은 수치를 나타내고 있으며 지표에 접근할 수록 그 수치는 급격하게 증가하여 h/r_o = 2인 지점에서 상대응력비가 약 2.0에 해당하는 최대치를 기록하여 차츰 감소하고 h/r_o = 4.6인 지점 부근에서 원지반 응력수준과 일치하게 된다. 지표부근에서는 오히려 마이너스 값을 나타내고 있다. 특히 h/r_o = 0.2에서 h/r_o = 4.6 부근까지 상대응력비가 증가하는 요인은 터널굴착에 따라 굴착부 지지압력이 감소하게 되며 σ_v가 감소함에 따라 이 응력 감소분이 주변지반에 전이되는 과정에서 arching 현상이 발생하여 수평방향의 토압분력이 증가하기 때문으로 사료된다. 이로부터 arching 현상이 최대가 되는 지점은 h/r_o = 2인 지점 부근이 됨을 생각할 수 있으며 이때 상대응력비는 약 2.0에 해당됨을 보이고 있다.

내부 지지압력 P_i변화에 따라서 지중응력은 별 차이를 보이지 않고 있다.

4.4 숏크리트 응력

해석결과에서는 soft shotcrete의 발생응력은 hard shotcrete의 응력에 비하여 약 1/10에 해당되는 작은 수준을 보이고 있기 때문에 여기에서는 hard shotcrete의 응력을 대상으로 분석하였다. 숏크리트 내에 발생

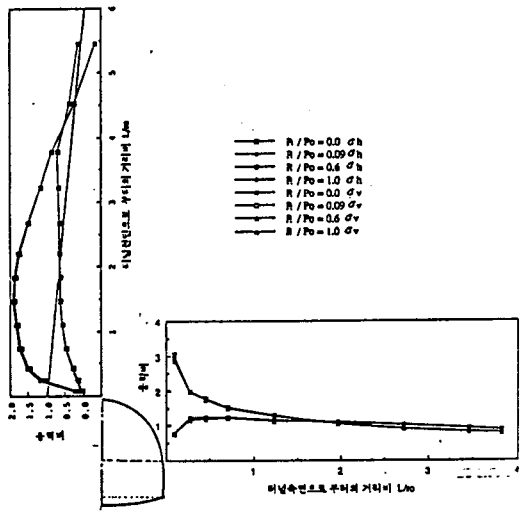


그림 7 지중응력 상대비 분포

된 응력을 내부지지압력 P_i 수준별로 굴착 최종단계를 기준하여 그림 8에 도시하였다. 그림의 응력분포곡선은 10개의 부재위에 연직방향으로 각각 축을 잡아 같은 축척비로 그 계산치를 도시하여 연결한 선이다. 그림에서 보듯이 P_i 수치는 클수록 전체적으로 응력수치는 감소함을 알 수 있다. 즉 P_i가 클수록 SL부근에서는 인장응력이 작은 수치를 나타내고 천단부 부근에서는 압축응력이 크게 나타나고 있다. 최대 압축응력은 P_i/P_o = 0.09의 경우 천단부근(1번부재)에서 발생되었으며 그 값은 34.24 kg/cm²에 해당되는데 이는 허용압축응력을 80 kg/cm²로 기준할 때 안전률은 약 2.34가 된다. 한편 최대 인장응력은 P_i/P_o = 0.09의 경우 SL부근(7번 부재)에서 발생되었고 그 값은 64.24 kg/cm²로 매우 큰 값이 계산되었다. 숏크리트나 1차 와이어메쉬가 받을 수 있는 인장응력은 극히 미약하기 때문에 이 해석결과에 의하면 천단부 부근에서 상당한 인장파괴가 예상된다. 물론 본 해석에서는 지반을 탄성연속체로 모델링 하였기 때문에 소성변형을 경험하는 굴착부에서는 실제보다 과도한 응력이 계산된 것은 사실이나 응력분포 형태의 경향을 판단할 수 있는 자료로 활용하고자 할 때 천단부에서는 과도한 인장응력이 발생됨을 알 수 있다.

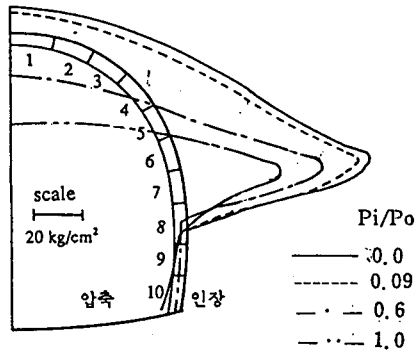


그림 8 P_i변화에 따른 숏크리트 부재내의 응력분포(굴착 7단계 기준)

4.5 록볼트 축력

록볼트에 작용하는 축력 F_i는 내부 지지압력 P_i 수준별로 굴착 최종단계를 기준하여 그림 9에 도시하였으며 자료는 최대 축력이 발생하는 지점(6번부재)의 계산 수치이다. 록볼트의 연장은 3 m이며 1 m 길이의 보요소 3개로 모델링 되어 있다. 따라서 그림 상에 도시된 자료는 각 요소의 축력 평균치이며 그 발생 위치는 각 요소의 중앙으로 간주하였다. 그림에서와 같이 P_i가 증가함에 따라 부재 내에 발생하는 축력 F_i는 증가함을 보이고 있다. 또한 축력의 최대치는 선단부에서 나타나며 지반속으로 들어갈수록 그 값은 감소함을 보인다.

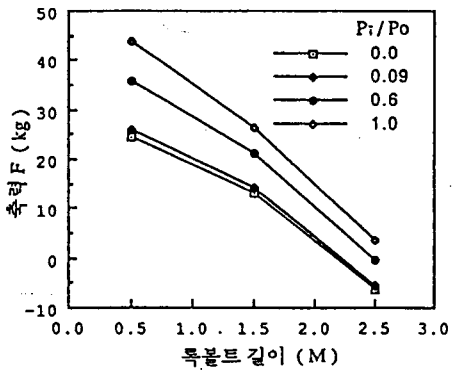


그림 9 P_i변화에 따른 록볼트 축력분포

록볼트 선단부에 작용하는 최대축력은 P_i/P_o = 0.09인 경우를 기준할 때 SL부근의 부재에서 F = 25.97 kg으로 가장 큰 값으로 나타났고 그림 10에서 $P_i = P_o$ 인 경우에도 F의 최대치는 약 44 kg을 나타내고 있다. 록볼트에 작용하는 축력의 크기는 P_i값의 크기와 작용조건에도 많은 영향을 받겠으나 이 경우에는 매우 작은 값이 기록되었다.

5. 결론

본 논문에서는 NATM 터널을 대상으로 유한요소해석을 실시하여 터널 굴착단계별 해석에 따른 영향과 터널막장으로부터의 굴진거리에 의한 영향을 중점적으로 분석하였다. 터널 굴착단계별 하중조건을 적절히 반영할 수 있도록 지반특성곡선 개념을 적용하여 터널굴착면 내부에 가상 지지압력을 재하시켰고 터널변위 특성곡선 개념을 적용하여 터널막장의 3차원적 지지효과를 고려하였다. 수치해석 결과의 분석은 다음과 같이 요약된다.

1) 지반침하량은 지표에서 터널쪽으로 깊이가 커짐에 따라 그 수치가 증가하고 횡방향 영향범위는 감소한다. Brand-Brenner 식의 계산결과와 비교하여 지표침하량과 천단침하량의 비가 근사하게 만족하였다.

2) 천단침하량의 증가추세는 하반굴착 완료시점부터 현저하게 둔화되는 반면에 내공변위량은 하반굴착 전까지 계속 증가하다 하반굴착단계에서 급격한 감소량을 보인후 다시 계속 증가하는 추세를 보였다.

3) 지중응력의 분포는 Kirsch 제안식의 계산수치와 비교하여 매우 근사하게 나타났으며 Spring line 에서의 접선방향 토압은 원지반 수직토압의 2.96배를 나타냈다. 천단부 상부 지표까지의 응력분포 형태에서는 arching 현상에 의하여 횡방향 토압이 터널반경의 0.2에서 4.6배 까지 높이에서 원지반 토압보다 크게 나타났으며 반경의 2배 높이 부근에서는 arching 현상이 가장 크게 발생되었다.

4) 숏크리트내에 발생된 응력은 가상 내부지지압력이 증가할수록 spring line 에서는 인장응력이 감소하고 천단부에서는 압축응력이 증가함을 나타내었으며 천단부에는 과도한 인장하중이 작용함을 나타내었다.

5) 록볼트 축력은 선단부에서 최대치를 나타내며 지반속으로 들어갈수록 감소함을 보였다. 또한 록볼트의 최대축력은 spring line 부근에서 발생함을 보였으며 가상 내부지지압력이 증가할 수록 증가함을 보였다. 전반적으로 록볼트 축력의 수치는 매우 작은 값을 나타내고 있다.

감사의 글

본 연구에 도움을 주신 한국건설기술연구원의 홍성완박사와 이원제 연구원에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한국전력공사 기술연구원 (1989), "토목구조물의 현장계측에 관한 연구," pp.312 -323.
2. Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B., Hoek, E. (1983), "Ground Response Curves for Rock Tunnels," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.109, No.1, pp.15-39.
3. Szechy, K.(1973), "The Art of Tunnelling," 2nd English Edition, Akademiai Kiado, Budapest.
4. Vassilev, V.H. & Hristov, T.N.(1988), "Influence of the Heading Face and a Two-Dimensional Calculation Model of Tunnel Linings," Numerical Methods in Geomechanics (Innsbruck 1988), Swoboda(ed.), pp.1551-1555.
5. Ward, W.H.(1978), "Ground Supports for Tunnels in Weak Rocks," Geotechnique 28, No.2, pp.133-171.