

3차원 유한요소법을 이용한 터널 막장 주위에서의 응력 재분배 해석에 관한 연구

문선경¹⁾ · 이희근²⁾

An Analysis for the Stress Redistribution around Tunnel Face Using Three-Dimensional Finite Element Method

Sun-Kyung Moon and Hi-Keun Lee

ABSTRACT In this paper the stress redistribution around tunnel face was analyzed by using a three-dimensional finite element model. The effects of in-situ stress levels, excavation sequences, stiffness difference between the hard ground and the weak zone on the stress redistributions were considered. Displacement and stress changes at tunnel crown, side wall, and invert were investigated throughout the sequential excavation. To show ground response, percentage of the displacement and stress variations are used as a function of normalized distance that is between the face and monitoring section. Preceding displacements and stress variations were presented to be adopted in the two-dimensional tunnel analysis.

1. 서 론

NATM공법을 따라 시공하는 많은 터널에서 가장 어려운 설계작업 중의 하나가 최초의 지보를 설치하는 시점의 결정이다. 현재까지 많은 경우에 설계자료로서 지반의 물성과 함께, 이를 사용한 2차원 해석결과를 이용하고 있다. 그러나 2차원 해석은 터널 종방향으로의 변위를 인정하지 않는 평면변형률 상태를 가정하고 있어, 실제의 다양한 지질조건을 고려하지 못하고 있으며 또한 실제의 굴착사이클(excavation cycle)을 무시하고 있는 것이 현실이다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 변위곡선에 기초한 하중분담률 기법을 개발하여 2차원 해석시 사용하고 있다. 그러나 기본적으로 해석의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 3차원 해석은 많은 수의 요소와 그 요소사이를 이어주는 많은 절점을 사용하므로 계산시간이 길어지는 단점이 있으나 물성을 원하는 지역에 줄 수 있어 다양한 응통성을 보인다. 따라서 해석하고자 하는 실제 지역과 같은 지역구분을 할 수 있는 장점이 있다.

굴착문제를 터널 단면의 2차원 평면해석으로 구하기 위한 방법으로 하중분담률 기법을 사용할 수 있다. 하중분담률은 막장의 진행상황에 따라 결정되며 터널 단면에서의 작용하중은 초기지압이 단면의 굴착형태에 따라서 재분배되는 양상에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 실시하여 물성이 동일한 지역, 심도별로 물성이 다른 지역, 터널 굴진 방향에 연약대가 있는 지역의 세가지 모델에 대하여 변위곡선의 변화와 응력재분배 현상을 규명하여 하중분담률 결정 및 이를 이용한 2차원 해석시의 입력자료로 활용할 수 있게 하였다. 그리고 전단면 굴착과 벤치를 이용하는 2단 굴착방법 차이에 따른 암반의 거동을 해석하였다.

2. 막장주위에서의 터널 종방향 아치효과

Fig. 1은 초기에 균형을 이루고 있는 응력상태를 형

*1995년 3월 2일 접수

1) 정회원, 코오롱건설 기술연구소

2) 정회원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

방향 아치성분과 종방향 아치성분으로 분해하여 그린 것이다. 굴착이 진행됨에 따라 종방향 아치성분은 점차 사라지고 결과적으로 횡방향 아치성분만 남게 된다. Fig. 2에 이러한 관계를 표시하였다. P_0 는 초기의 지압 상태로 이때는 횡방향 아치와 종방향 아치성분이 모두 균형상태를 유지하고 있다. 그러나 막장이 가까와짐에 따라 종방향 아치성분이 부담하고 있던 지압은 점차 줄어들고, 이에 따라 변형이 생기게 된다. 또한 종방향 아치성분이 부담하고 있던 지압중 상당부분은 변형으로 개방되고 나머지는 횡방향성분으로 전가된다.¹⁾ P_t 는 횡방향 아치성분이 부담하는 응력이고 P_l 은 종방향 아치성분이 부담하는 응력이다. 그리고 P_r 은 터널의 변형으로 인해 개방된 응력량이다. 종방향 아치성분이 부담하던 응력이 막장으로부터의 거리에 따라 재분배되는 비율을 하중분담률이라고 한다.⁶⁾

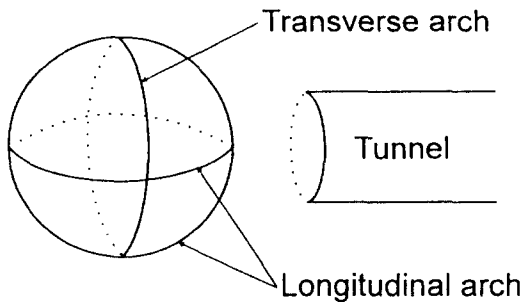
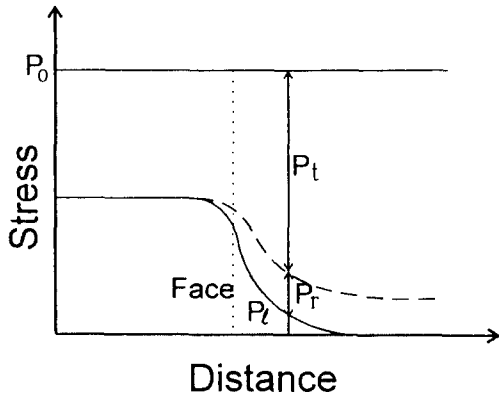


Fig. 1. Longitudinal and transverse arch components before the excavation.



P_0 : Geostatic pressure supported by transverse arch effect
 P_t : Geostatic pressure supported by longitudinal arch effect
 P_r : Geostatic pressure released by excavation

Fig. 2. Curves of the longitudinal and transverse arch effects.

3. 3차원 유한요소 모델 설정

굴착단계별로 응력의 변화양상과 변위거동을 해석하기 위하여 범용 유한요소해석 코드(code)인 ABAQUS를 사용하여 3차원 모델해석을 수행하였다. 진단면굴착 모델의 형태는 Fig. 3과 같다. 벤치굴착 모델에서 하단 굴착은 상단굴착후 터널폭의 2배만큼 뒤에서 이루어지는 것으로 가정하였다. 모델은 선형탄성이라고 가정하고 이를 기본으로 하여 심도별로 물성이 다른 지역과 터널굴진 방향에 연약대가 있는 경우를 설정하여 3가지 경우에 대해서 해석하였다. 모든 경우에 단층, 절리와 같은 불연속면은 없다고 가정하였으며 지하수 문제도 고려하지 않았다. 따라서 굴착에 따른 터널 주위 암반의 공극수압 문제도 제외되었다.

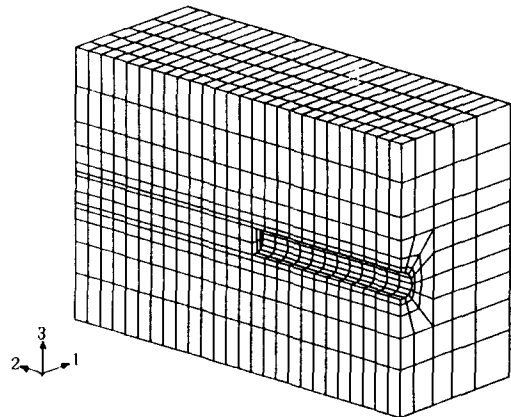
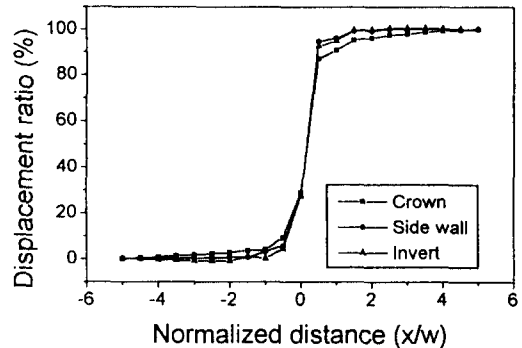


Fig. 3. A model of full face excavation.



x : Distance between face and monitored section
 w : Tunnel width

Fig. 4. Displacement curves for $K=1.0$ in the case of full face excavation.

터널의 모양은 말발굽형이고 폭은 8 m, 높이는 7 m이다. 모델의 총요소수는 1742개이고 총절점수는 2268개이다. Fig. 3에서 모델의 1 방향으로의 폭은 40 m로 터널폭의 5배이고 2 방향으로의 길이는 104 m로 터널폭의 13배이다. 3 방향으로의 높이는 70 m로서 터널높이의 10배로 터널의 영향이 없는 지점까지 설정하였다.

4. 물성이 동일한 지역의 해석 및 검토

모델 전지역의 탄성계수는 784.0 MPa, 포아송비는 0.25, 단위중량은 2400 kg/m³로 가정하였다.

4.1 전단면 굴착

Fig. 4는 축압계수 K=1.0인 경우의 굴착단계에 따른 변위곡선이다. 터널의 천정, 측벽, 바닥에서의 변위를 관찰하였으며 모두 터널중심으로 향하는 방향을 양으로 하여 총변위량을 기준으로 표시하였다. 수평축은 해석단면과 막장과의 거리(x)를 터널폭(w)으로 나눈 값이다. '-' 부호는 아직 굴착되지 않은 상태로서 막장이 해석단면으로 점차 접근하는 상태이다. '0'은 해석단면이 막장과 일치할 때의 상태이며, '+' 부호는 막장이 해석단면을 통과한 상태이다. 해석단면으로부터 터널폭의 2배 가량의 전방에서부터 굴착으로 인한 변위가 나타나기 시작하여 터널폭의 1.5배 정도의 후방에서 거의 수렴하고 있다.

Fig. 5는 축압계수 K=1.0일 때 막장과의 거리에 따른 터널벽면 주위의 응력상태를 표시한 것이다. 여기에서의 응력은 각 지점에서 터널중심 방향으로의 응력(Radial stress)으로, 천정과 바닥에서는 수직응력이고 측벽에서는 수평응력이다. 그림에서의 응력값은 최종 응력변화량을 기준으로 백분율로 표시하였다. 초기응력값이 100이고 최종수렴된 응력값이 0이다. 응력은 막장이 해석단면에 도달하기 전까지는 조금씩 증가하다가 막장이 해석단면 통과 직후 급격히 감소하며 수렴한다. 이러한 응력거동양상은 Eisenstein 등(1984)이 발표한 논문결과와 일치하고 있다.²⁾ 즉 막장이 도달하기 직전에 응력집중이 발생하고 막장부근에서는 변위의 기울기가 터널중심 방향의 응력변화 기울기보다 작은 계측결과를 보고한 바 있다.

막장면거리가 0일때 막장의 천정, 벽면 등에서 발생한 변위 또는 응력량을 최종값으로 나눈 값을 선행변위비(Preceding displacement ratio) 또는 선행응력

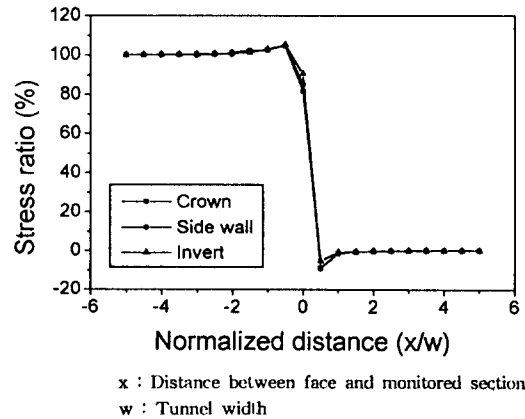


Fig. 5. Radial stress curves for K=1.0 in the case of full face excavation.

Table 1. Preceding displacement ratios(%) for full face excavation (homogeneous model)

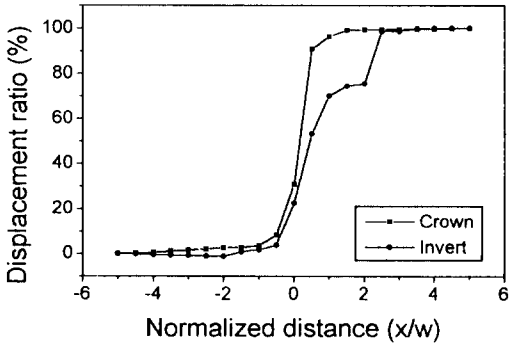
| Point | K | | |
|-----------|--------------|-------------|-------------|
| | 0.5 | 1.0 | 2.0 |
| Crown | 31.7 (11.5)* | 28.9 (18.3) | 24.4 (34.0) |
| Side wall | 23.4 (35.7) | 27.7 (14.9) | 29.1 (7.2) |
| Invert | 28.5 (8.1) | 27.2 (10.4) | 24.6 (20.4) |

* preceding stress ratio (%)

비(Preceding stress variation ratio)라 한다.³⁾ Table 1은 축압계수에 따른 선행변위비와 선행응력비를 백분율로 표시한 것이다. 축압계수가 커짐에 따라 천정과 바닥지점의 선행변위비는 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있고 측벽지점의 값은 조금씩 증가하고 있다. Chen 등(1994)도 축압계수가 커짐에 따라 천정과 바닥의 선행변위비는 감소하고 측벽의 선행변위비는 커진다는 연구결과를 발표한 바 있다.⁴⁾ K=1.0일 때는 천정, 측벽, 바닥 각 지점에서 선행변위비가 비슷하고 응력변화 곡선도 거의 같다. 축압계수가 커짐에 따라 응력변화비는 선행변위비와 반대의 경향성을 보이고 있어 굴착 이후 측벽지점의 응력개방이 급격히 이루어진다는 것을 알 수 있다. 따라서 축압계수가 클 때는 측벽지점의 종방향 아치효과와 변화가 크고 축압계수가 작을 때는 천정과 바닥에서의 변화가 상대적으로 크다.

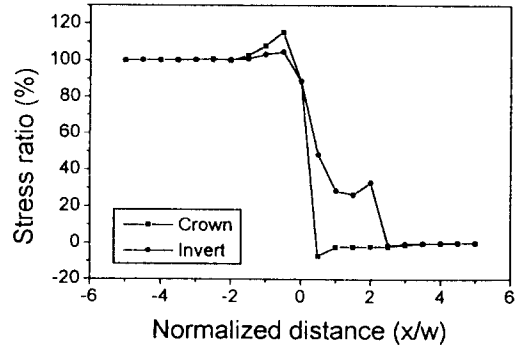
4.2 벤치 굴착

Fig. 6은 축압계수 K=1.0일 때 굴착단계에 따른 천정, 바닥지점의 변위곡선이다. 변위곡선의 수평축은 터



x : Distance between face and monitored section
w : Tunnel width

Fig. 6. Displacement curves for K=1.0 in the case of bench excavation.



x : Distance between face and monitored section
w : Tunnel width

Fig. 7. Radial stress curves for K=1.0 in the case of bench excavation.

널 상단부 막장과 해석단면과의 거리관계를 표시하는 것이므로 하단부의 굴착은 2단계만큼 뒤에서 이루어진다. 벤치굴착의 경우는 천정, 바닥지점의 거동양상만을 해석하였다. 천정지점의 변위는 전단면굴착시와 같은 형태의 곡선을 보이고 있다. 반면 바닥지점의 변위는 벤치굴착의 형태를 뚜렷히 보여주고 있다. 즉, 상단부가 굴착되면서 어느 정도의 변위가 생긴이후 하단부가 굴착되며 최종수렴값에 근접한다.

Fig. 7은 축압계수 K=1.0일 때 굴착단계에 따른 천정, 바닥지점의 응력곡선이다. 천정지점의 경우, 막장이 가까이 접근함에 따라 응력이 조금 증가하고 상단부가 먼저 굴착되면서 감소한다. 바닥지점에서는 상단부가 먼저 굴착됨에 따라 하단부 막장이 도달하기 전에 응력증가가 거의 발생하지 않는다. 그리고 변위곡선의 경우와 마찬가지로 벤치굴착의 형태를 뚜렷히 보여주고 있다.

이 논문에서 벤치굴착의 해석결과를 표로 정리할 때의 단계(step)구분은 Fig. 8과 같이 한다. 즉, A단계는 상단 막장이 해석단면과 일치할 때이고 B단계는 하단 막장이 해석단면과 일치할 때이다.

Table 2에 축압계수에 따른 A, B 단계에서의 변위량

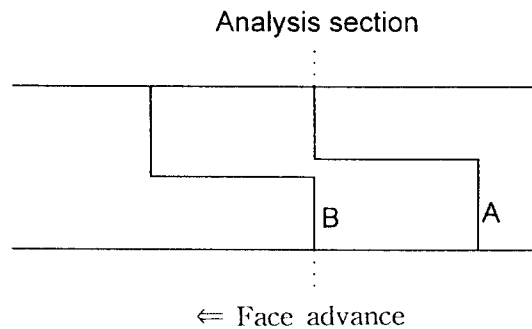


Fig. 8. Step definition in the bench excavation.

과 응력변화량을 최종수렴변위를 기준으로 나타내었다. 벤치굴착에서는 상단굴착전에 발생하는 선형변위는 축압계수의 값이 0.5에서 2.0까지 변함에 따라 26.6%에서 42.1%까지 변하고 있다. 바닥지점에서는 축압계수가 커짐에 따라 A단계에서의 변위비가 커지고, 하단부의 막장이 해석단면과 일치하는 B단계에서의 값은 작아진다. 천정지점에서의 응력은 축압계수가 커짐에 따라 A단계에서의 값이 작아진다. 그에 비해 바닥지점의 값은 거의 일정하다.

Table 2. Displacement ratios(%) at step A, B for bench excavation (homogeneous model)

| Step | K, Point | | | | | |
|------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | 0.5 | | 1.0 | | 2.0 | |
| | Crown | Invert | Crown | Invert | Crown | Invert |
| A | 26 (95.3)* | 18.5 (90.6) | 31.0 (88.8) | 22.6 (88.8) | 42.1 (68.0) | 24.7 (88.4) |
| B | 93.8 (0.0) | 79.2 (23.7) | 99.8 (-2.0) | 75.5 (33.1) | 114.3 (-4.6) | 70.7 (37.4) |

* stress ratio (%)

5. 심도에 따라 물성이 다른 지역의 해석 및 검토

실제 현장에서 천부터널을 굴착할 때는 심도에 따라 지반의 물성이 다른 경우가 많다. 여기서는 Fig. 9와 같이 심도에 따라 4부분으로 나누어 각기 다른 물성을 부여하였다. 모델의 윗부분에서부터 심도 10 m, 25 m,

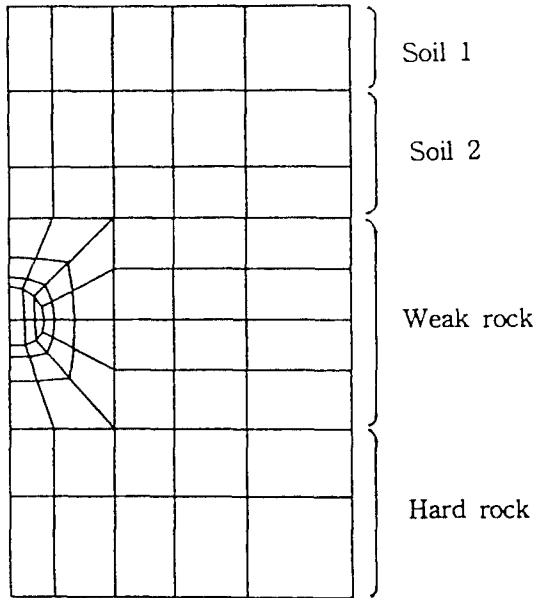


Fig. 9. Zone division of the material properties.

Table 3. Mechanical properties of soil and rock layers.

| Property | Zone | | | |
|----------------------------------|--------|--------|-----------|-----------|
| | Soil 1 | Soil 2 | Weak rock | Hard rock |
| Elastic Modulus (MPa) | 9.8 | 68.6 | 784.0 | 1080.0 |
| Poisson's ratio | 0.35 | 0.3 | 0.27 | 0.25 |
| Unit weight (kg/m ³) | 1.7 | 2.1 | 2.3 | 2.6 |

50 m, 70 m를 기준으로 하여 Table 3과 같이 물성을 주었다.

해석결과중에서 변위곡선과 응력곡선은 생략하고 구체적인 수치만을 Table 4, 5에 나타내었다. Table 4는 전단면 굴착에서 측압계수에 따른 선형변위비와 선형응력비를 백분율로 표시한 것이다. K=1.0일 때보다 측압계수가 더 커질 때는 측벽지점에 응력집중이 더 생기게 되고 따라서 굴착후 측벽지점의 응력변화가 큰 것을 알 수 있다.

Table 5는 벤치굴착에서 측압계수에 따른 A, B 단계별 변위와 응력변화량을 최종수량에 대하여 백분율로 표시한 것이다. Table 4와 5에서 볼 수 있듯이 전단면굴착과 벤치굴착의 각 굴착방법에 따른 심도에 따라 물성이 다른 지역의 해석결과는 물성이 동일한 지역의 해석결과와 비교하여 각 굴착단계에서의 변위비와 응력비는 별다른 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

6. 연약대 지역의 해석 및 검토

터널의 굴진방향으로 연약대가 있는 경우에 대하여 해석하였다. Fig. 10과 같이 빗금친 부분에 연약대를 설정하였다. 연약대는 굴진방향으로 16 m의 폭을 가지며, Table 6과 같이 물성을 주었다. Fig. 10에서 A지점은 연약대와 기타지역의 경계지점이고 B지점은 연약대 내부지점이다. A와 B를 각각 포함하는 수직단면을 해석하였다.

Table 4. Preceding displacement ratios(%) for full face excavation (different properties model).

| Point | K | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| | 0.5 | 1.0 | 2.0 |
| Crown | 31.2 (9.9)* | 29.0 (17.4) | 25.5 (35.1) |
| Side wall | 23.4 (38.2) | 27.7 (14.3) | 29.2 (9.6) |
| Invert | 28.2 (8.6) | 27.0 (10.4) | 24.1 (22.4) |

* preceding stress ratio (%)

Table 5. Displacement ratios (%) at step A, B for bench excavation (different properties model)

| Step | K, Point | | | | | |
|------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | 0.5 | | 1.0 | | 2.0 | |
| | Crown | Invert | Crown | Invert | Crown | Invert |
| A | 26.5 (95.5)* | 17.8 (90.6) | 29.9 (91.4) | 20.7 (89.4) | 42.3 (68.2) | 24.9 (87.5) |
| B | 93.8 (0.0) | 78.4 (23.2) | 99.1 (-1.9) | 74.0 (33.4) | 110.5 (-4.9) | 71.6 (37.0) |

* stress ratio (%)

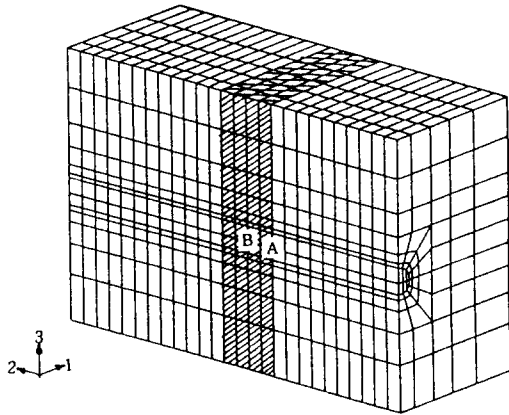


Fig. 10. A model of the region of weak zone.

Table 6. Mechanical properties of the model.

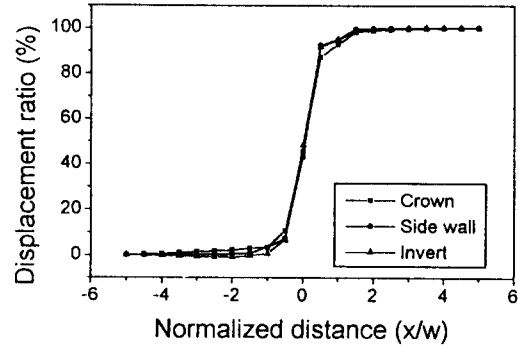
| | Elastic modulus (MPa) | Poisson's ratio | Unit weight (kg/m ³) |
|----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------|
| Weak zone | 68.6 | 0.3 | 2.1 |
| The other zone | 784.0 | 0.25 | 2.4 |

6.1 전단면 굴착

6.1.1 연약대 경계지점의 거동

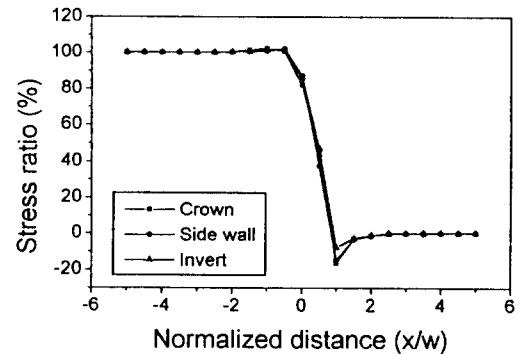
Fig. 11은 축압계수 $K=1.0$ 에서 굴착단계에 따른 변위곡선이다. 전체적으로 일반적인 변위곡선의 형태를 보여주고 있으나 선행변위비가 큰 것을 알 수 있다. Fig. 12는 같은 경우에서의 응력곡선이다. 일반적인 응력곡선은 굴착이 이루어지면서 응력이 급격히 감소하는데 비하여 연약대 경계지점의 응력은 한단계 뒤에서 최종값 가까이 감소하고 있다. 막장이 경계지점으로 다가옴에 따라 조금씩 증가하던 응력이 굴착으로 인하여 개방되나 탄성계수가 작은 연약대지역의 굴착으로 상당부분의 응력이 연약대의 변형에 사용되었다. 따라서 Fig. 11과 Fig. 12에서 정규화거리(normalized distance)가 +0.5일 때 변위는 최종수렴변위의 90%이상의 값을 보이는데 응력은 최종변화량의 40-50% 정도가 아직 남아있다. 이 응력분은 연약대가 굴착되면서 연약대의 변형에 쓰인다.

Table 7은 축압계수에 따른 선행변위비와 선행응력비를 백분률로 나타낸 것이다. $K=0.5$ 인 경우의 평균선행변위비는 43.0%이고 $K=1.0$ 일 때는 45.4%, $K=2.0$ 일 때는 49.3%로 변한다. 물성이 동일한 지역에 대한 해석 결과와는 달리 축압계수가 커질수록 천정, 측벽, 바닥



x : Distance between face and monitored section
 w : Tunnel width

Fig. 11. Displacement curves for $K=1.0$ in the case of full face excavation.



x : Distance between face and monitored section
 w : Tunnel width

Fig. 2. Radial stress curves for $K=1.0$ in the case of full face excavation.

Table 7. Preceding displacement ratios (%) for full face excavation. (weak zone model, at section A)

| Point | K | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| | 0.5 | 1.0 | 2.0 |
| Crown | 42.9 (9.1)* | 45.5 (18.8) | 51.5 (-) |
| Side wall | 40.5 (-) | 42.3 (12.8) | 43.5 (7.2) |
| Invert | 45.5 (8.3) | 48.4 (13.7) | 52.8 (30.4) |

* preceding stress ratio (%)

지점의 선행변위비는 모두 증가하는 경향을 보인다. 빈 칸으로 남겨진 곳("-"로 표시한 곳)은 초기의 응력값이 굴착이 완료된 후에도 거의 변하지 않은 지점이다. $K=0.5$ 일 때는 측벽에서, $K=2.0$ 에서는 천정지점에서 응력

변화가 생기지 않았다. 연약대와외의 경계에서는 축압계수가 작을 때 측벽지점에서 터널중심부로 변형은 될지라도 초기의 응력을 그대로 유지하고 있다. 축압계수가 클 때는 천정지점에서 그러한 거동이 나타난다.

Table 8. Preceding displacement ratios (%) for full face excavation (weak zone model, at section B)

| Point | K | | |
|-----------|--------------|-------------|-------------|
| | 0.5 | 1.0 | 2.0 |
| Crown | 29.1 (20.4)* | 30.3 (17.0) | 33.4 (13.2) |
| Side wall | 28.1 (10.9) | 29.1 (14.3) | 30.6 (18.3) |
| Invert | 28.6 (16.6) | 30.0 (14.2) | 31.2 (11.5) |

*preceding stress ratio (%)

6.1.2 연약대 내부지점의 거동

Fig. 10에서 도시한 B지점의 거동을 해석하였다. 이 지점은 연약대내에서 중앙에 있기 때문에 가장 많은 변형이 발생하는 곳이다. Fig. 13과 Fig. 14는 축압계수 K=1.0일 때 굴착단계에 따른 변위곡선, 응력곡선이다. 천정, 측벽, 바닥 3지점의 변위와 응력곡선이 서로 일치하고 있다. 연약대에 응력이 집중되면서 각 지점간의 응력변화양상이 같아지는 것을 알 수 있다.

Table 8은 축압계수에 따른 선형변위비와 선형응력비를 백분율로 나타낸 것이다. 선형변위비는 각 축압에서 거의 같은 값으로 일치하고 있으며 축압계수가 커짐에 따라 천정, 측벽, 바닥지점에서 모두 조금씩 증가하고 있다. 전체적인 평균값은 30.0%이다. 축압계수가 커

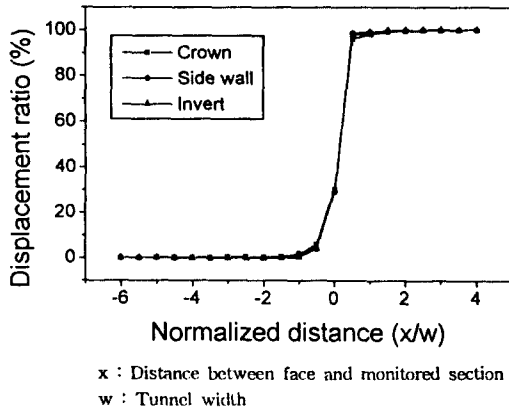


Fig. 13. Displacement curves for K=1.0 in the case of full face excavation.

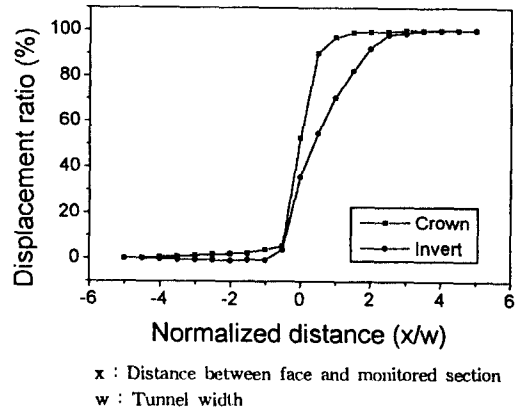


Fig. 15. Displacement curves for K=1.0 in the case of bench excavation.

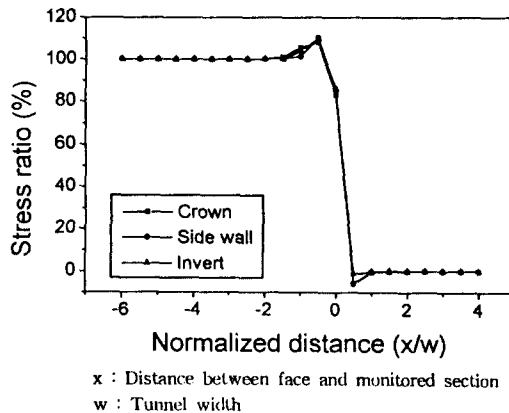


Fig. 14. Radial stress curves for K=1.0 in the case of full face excavation.

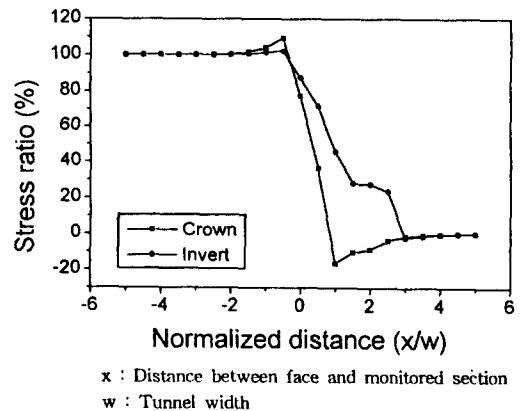


Fig. 16. Radial stress curves for K=1.0 in the case of bench excavation.

짐에 따라 천정과 바닥지점의 선형응력비는 작아지고 측벽지점에서는 커지고 있다. 즉, 측압계수가 커짐에 따라 측벽에 비하여 천정과 바닥지점에서의 응력이 굴착이후 더 빨리 변화가 생김을 알 수 있다.

6.2 벤치 굴착

6.2.1 연약대 경계지점의 거동

Fig. 15는 측압계수 K=1.0일 때 굴착단계에 따른 천정, 바닥지점의 변위곡선이다. 천정지점은 일반적인 변위곡선을 보이고 있으나 바닥지점은 벤치굴착의 형태를 뚜렷이 보여주고 있지는 않다.

Fig. 16은 측압계수 K=1.0일 때 굴착단계에 따른 응력곡선이다. 전단면 굴착의 경우와 마찬가지로 벤치굴

착에서도 응력곡선이 변위곡선보다 한단계씩 뒤에서 변화를 보이고 있다. 즉, 천정지점의 변위곡선은 정규화거리가 +0.5에서 90% 이상의 값을 보이며 점차 수렴하나 응력곡선은 한단계 뒤인 +1.0에서 응력이 크게 감소하고 있다.

Table 9는 측압계수에 따라 각 굴착단계에서의 변위비와 응력변화비를 백분율로 표시한 것이다. 측압계수가 커지면 천정과 바닥지점에서 모두 상단부의 선형변위비와 하단부의 선형변위비가 증가한다.

6.2.1 연약대 내부지점의 거동

Fig. 17은 측압계수 K=1.0일 때 굴착단계에 따른 연약대 내부지점의 변위곡선이다. 정규화거리가 -1이하의 가까운 거리에서 변화가 생기기 시작하여 굴착후 비교

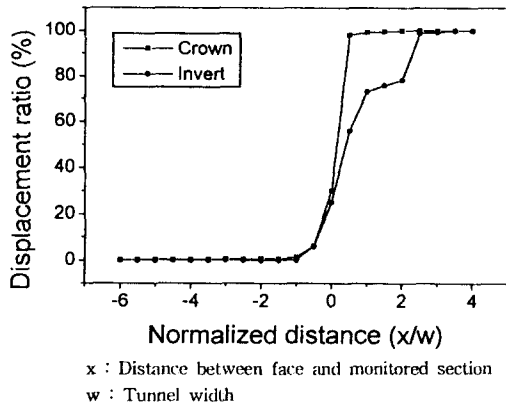


Fig. 17. Displacement curves for K=1.0 in the case of bench excavation.

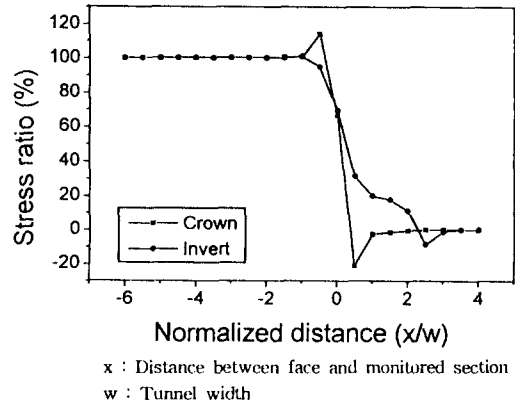


Fig. 18. Radial stress curves for K=1.0 in the case of bench excavation.

Table 9. Displacement ratios (%) at step A, B for bench excavation (weak zone model, at section A)

| Step | K, Point | | | | | |
|-------------|----------|--------|-----|-------------|-------------|-------------|
| | 0.5 | 1.0 | 2.0 | Crown | Invert | Crown |
| Invert | Crown | Invert | A | 46.7 (90.3) | 32.0 (91.6) | 52.8 (77.4) |
| | | | B | 98.8 (-5.2) | 90.3 (37.5) | 99.4 (-8.9) |
| 35.8 (87.4) | | | | | | |

Table 10. Displacement ratios (%) at step A, B for bench excavation (weak zone model, at section B)

| Step | K, Point | | | | | |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0.5 | | 1.0 | | 2.0 | |
| | Crown | Invert | Crown | invert | Crown | Invert |
| A | 28.7 (64.8) | 25.2 (68.1) | 30.0 (66.5) | 24.8 (69.5) | 34.4 (67.5) | 23.0 (72.2) |
| B | 98.8 (-5.2) | 79.5 (5.6) | 99.9 (-0.6) | 78.1 (11.3) | 106.3 (0.2) | 76.9 (20.1) |

적 빨리 수렴한다. Fig. 18은 축압계수 $K=1.0$ 일 때 굴착단계에 따른 연약대 내부지점의 응력곡선이다. 연약대 지역이 아직 굴착되지 않았을 때는 연약대 내부지점들은 별다른 영향을 받지 않고 있으나 연약대가 굴착되면서 많은 변화가 생기는 것을 볼 수 있다.

Table 10은 축압계수에 따른 각 굴착단계에서의 변위비와 응력비를 백분율로 표시한 것이다. 축압계수가 커지면 바닥지점은 B단계에서 응력을 어느 정도 유지하고 있다. 따라서 벤치는 축압계수가 클 때 더 큰 지보 역할을 하는 것을 알 수 있다.

7. 결 론

막장주위에서의 응력재분배와 암반거동을 파악하기 위하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 물성이 동일한 지역, 심도에 따라 물성이 다른 지역 그리고 연약대 지역의 3가지 모델을 설정하였다. 얻어진 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 물성이 동일한 모델에서 전단면 굴착의 경우 선행 변위비는 축압계수 $K=1.0$ 일 때 28%이다. 축압계수가 커짐에 따라 천정과 바닥지점의 선행변위비는 작아지고 측벽에서의 선행변위비는 증가한다. 선행응력비는 선행변위비와 반대의 경향성을 보인다. 따라서 축압계수가 클 때는 굴착이후 측벽지점의 응력개방이 급격히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

2) 물성이 동일한 모델에서 벤치 굴착의 경우 천정지점의 변위곡선은 전단면 굴착의 경우와 비슷하나 바닥지점의 변위곡선은 벤치굴착의 형태를 보여주고 있다. 상단굴착전에 발생하는 천정지점의 선행변위비는 축압계수가 커짐에 따라 커지고 있고 하단굴착전에 발생하는 바닥지점의 선행변위비는 작아진다.

3) 연약대 모델의 경계지점에서는 초기의 응력이 조금씩 증가하다가 굴착이 진행되면서 응력이 작아지고

변위가 생기나, 연약대가 굴착되면 남아있는 응력이 연약대의 변형에 사용되어 경계지점에서의 변위는 더이상 발생하지 않는다. 또한 천정, 측벽, 바닥의 3지점에서 모두 축압계수가 커짐에 따라 선행변위비가 증가한다.

4) 연약대 내부지점에서는 천정, 측벽, 바닥 3지점의 변위곡선이 거의 일치하고 있으며 이는 축압계수가 달라져도 마찬가지이다. 그리고 막장이 내부지점과 터널 폭 이하의 거리이내에서 변화가 생기기 시작하고 완료된다.

참 고 문 헌

1. Sinha, R.S., 1989, *Underground Structures : Design and Instrumentation*, Elsevier, pp. 31-38, 77-128.
2. Eisenstein, ASCE, Heinz H. and Negro A., 1984, *On Three-Dimensional Ground Response to Tunnelling*, Proceedings of Two Sessions at Geotech '84, ASCE, pp. 107-127.
3. Kitagawa, T., Kumeta, T., Ichizyo, T., Soga, S., Sato, M. and Yasukawa, M., 1991, *Application of convergence confinement analysis to the study of preceding displacement of a squeezing rock tunnel*, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp. 31-51.
4. Chen, W.P. and Baldauf, S., 1994, *Prediction of ground deformations due to excavation-Application to tunnel lining design in weak rock*, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Rotterdam, pp. 2565-2570.
5. ABAQUS user's manual, Version 5.2, 1992, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.
6. 정대열, 1993, 터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구, 서울대학교 공학박사 학위논문.