파쇄대 예측을 위한 터널의 3차원 수치해석

3-Dimensional Tunnel Analyses for the Prediction of Fault Zones

이 인 모*[1] 김 돈 희*[2]

Lee, In - Mo Kim, Don - Hee

이 석 원*[3] 박 영 진*[4]

Lee, Seok - Won Park, Young - Jin

안 형 준*[5]

An, Hyung - Jun

Abstract

When there exists a fault zone ahead of the tunnel face and a tunnel is excavated without perceiving its existence, it will cause stress concentration in the region between the tunnel face and the fault zone because of the influence of the fault zone on the arching phenomena. Because the underground structure has many unreliable factors in the design stage, the prediction of a fault zone ahead of the tunnel face by monitoring plans during tunnel construction and the rapid establishment of appropriate support system are required for more economical and safer tunnel construction. Recent study shows that longitudinal displacement changes during excavation due to the change of rock property, and if longitudinal displacement and settlement, which are measured in the field, are considered together in displacement analysis, the prediction of change in rock mass property is possible. This study provided the method for the prediction of fault zones by analyzing the changes of L/C and (Ll-Lr)/C ratio (L = longitudinal displacement at crown, C = settlement at crown, Ll = longitudinal displacement at left sidewall, Lr = longitudinal displacement at right sidewall) and the stereographic projection of displacement vectors which were obtained from the 3-D numerical analysis of hybrid method in various initial stress conditions.

*[1] 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과, 교수

*[2] 정회원, (주) 덕천엔지니어링, 연구원

*[3] 정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구원

*[4] 정회원, 코오롱건설(주) 기술연구소, 차장

*[5] 정회원, 코오롱건설(주) 기술연구소, 대리

요 지

막장 전방에 파쇄대 등의 불연속면이 존재할 경우, 이를 미리 예측하지 못한채로 굴진을 하게 되면 파쇄대로 인해 터널 굴진에 따라 발생된 종방향 아칭에 영향을 주어 막장면 전방에 응력이 집중하게 된다. 터널 및 지하공간의 설계시에는 불확실한 설계요소를 과다하게 내포하고 있으므로 경제적이고 안정성이 확보된 터널 시공을 위해서는 터널 막장면에서의 정확한 계측으로 막장 전방의 파쇄대를 예측하여 터널 지보체계에 신속히 대비함이 필요하다. 최근의 연구결과에 의하면 3차원 절대변위계측에 의해 터널의 시공 시 굴진에 따라 지반의 강도차이로 인해 발생된 종방향 변위의 변화를 측정하여 막장 전방의 불연속면을 미리 예측할 수 있다고 하였다. 본 연구는 혼합법을 사용한 3차원 수치해석으로부터 얻어지는 변위로부터 L/C (천단부의 종방향 변위[L]와 천단부의 침하량[C]의 비)와 S/C (측벽의 수평방향 변위[S]와 천단부의 침하량[C]의 비), (Ll-Lr)/C (좌측벽의 종방향변위[Ll]와 우측벽의 종방향변위[Lr]의 차와 천단부의 침하량[C]의 비), 평사투영법을 중심으로 지반에 파쇄대가 존재할 경우에 대해 여러 가지 초기 지중응력조건에서 터널 굴착에 따른 3차원 절대 변위를 분석하여 그 존재를 예측할 수 있는 기법을 제시하였다.

Keywords : Arching effect, Fault zone, 3-dimensional monitoring, 3-dimensional absolute displacement, Hybrid method

1. 서 론

지하암반은 여러 가지 지구 물리학적 활동에 의해 많은 불연속면을 갖고 있으며, 여러 가지 지각활동으로 불규칙한 초기 지압이 내재되어 있는 불균질한 이방성의 매질이다. 현장에서는 이러한 원인으로 초기 지중응력이 등방이 아니고, 주응력의 방향도 터널 축과 일치하지 않는 경우가 대부분이다. 지하암반은 굴착 등에 의한 교란이 주어지기 전에는 안정한 상태에 놓여있으나, 인위적인 지하공간(터널)을 형성하게 되면 새로운 평형을 찾으려는 응력의 재배치가 발생하게 되는데 불연속면의 특성과 초기주응력의 영향에 따라 독특한 거동 양상을 보이게 되고, 그 크기에 따라 터널주위 암반의 안정성에 위험을 줄 수도 있다. 지반의 불연속면은 사전 조사 단계에서의 지표 지질조사만으로는 확인하기가 쉽지 않다. 이러한 불연속면은 터널 굴진 시 갑자기 나타나 터널의 붕괴 및 붕락과 같은 사고를 일으키는 주 요인이 되고 있으므로 사전에 감지할 수 있는 예측기법이 필요하다. 따라서, 본 연구는 터널 시공 시 하중전이 효과(arching effect)로 인한 응력의 재배치를 고려하여, 혼합법(hybrid method)에 의해 3차원 수치해석을 수행함으로써 지반의 강성차이가 큰 파쇄대가 막장전방에 존재할 경우에 초기 지중응력 분포의 변화에 따른 3차원 절대내공 변위의 양상을 파악하여 이를 예측하고, 이미 이 등(1997)에 의해 연구된 파쇄대의 강성차이의 비 및 파쇄대의 방향에 따른 3차원 절대내공 변위 경향과의 차이를 규명하여 각 경우의 적절한 지보패턴선정에 도움이 되도록 하여 터널시공에 있어 효율적인 정보화 시공을 위한 근간을 마련하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 아칭효과

지하구조물의 시공은 현재 자연에 존재하는 평형을 깨뜨려 새로운 평형상태에 이르게 하는

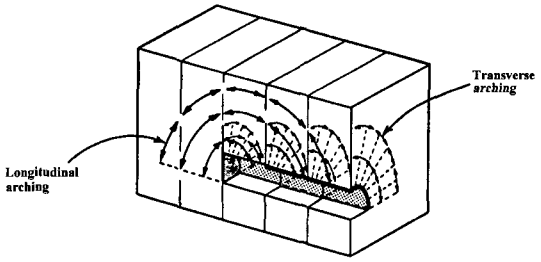


그림 1. 터널주위의 3차원 아칭효과

작업이다. 초기응력을 내재하고 있는 지반에 터널을 굴착하게 되면 터널주위로 응력의 전이가 발생하게 되는데 이러한 새로운 응력의 평형상태를 찾으려는 자연의 노력을 아칭효과가 한다. 보다 강한 지반으로 응력의 증가가 크게 발생하므로 지반 내에 파쇄대가 존재할 경우 이러한 아칭에 영향을 주게 된다. 그림 1은 터널주위로의 3차원 아칭을 보인 것이다.

2.2 초기 지중응력의 영향

연직방향 초기지중응력은 깊이에 따라 증가하지만 수평응력은 등방이 아니고 방향도 터널축과 일치하지 않는다. 초기 지중응력이 다를 경우 계측되는 변위 또한 달라지게 된다. Lo 등(1984)에 의하면 초기지중응력비가 증가함에 따라 천단의 변위가 감소한다고 하였다. 그리고, Pelli 등(1991)에 의하면 횡방향으로 일정한 지중응력을 받고 있는 지반에서 터널 축방향의 응력이 커짐에 따라 천단에서의 변위는 더욱 증가한다고 하였다. 실 계측에 있어서 막장면에서 일정한 거리 뒤(통상 한 막장 뒤)에 계측점이 설치되었다고 하더라도, 천단에서의 변위의 크기는 축방향응력이 클수록 커지게 된다.

2.3 3차원 절대변위

현장에서 측정하는 3차원 절대변위와 동일한

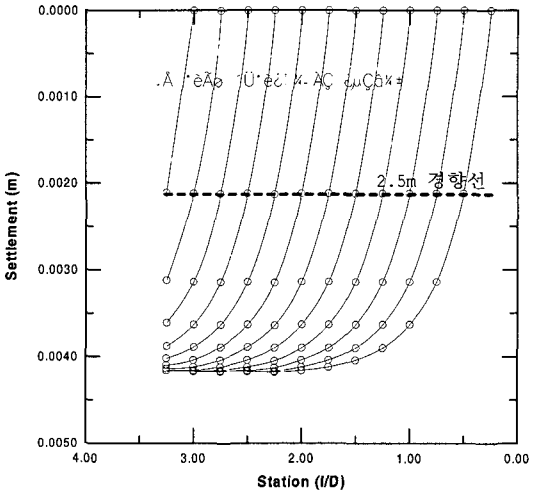


그림 2. 천단에서 침하에 대한 영향선 및 경향선

조건에서 변위해석을 실시하기 위하여 다음과 같은 작업을 통해 각 변위요소를 찾아내었다. 수치해석 시 발생하는 선행변위의 소거를 위하여 막장면에서 한 막장(2.5m) 떨어진 곳의 변위를 0으로 하여 이를 계측점이 설치되는 시기로 하였고 굴착에 따라 발생하게 되는 변위를 누적하게 된다. Schubert 등(1996)은 계측된 변위의 해석을 위해 영향선과 경향선을 제시하였는데, 같은 시간에 측정한 각 계측점에서 측정된 변위의 각 요소를 이은 선이 영향선이고 영향선의 원점에서 일정거리 떨어진 곳의 변위를 이은 선이 경향선이다. 본 연구에서 계측점의 위치는 막장면에서 2.5m 후방이고, 경향선은 영향선의 시작점(변위가 0인 점)에서 2.5m 떨어진 곳의 변위를 이용하였다. 즉, 막장면은 경향선의 각 점에서 5m 전방에 위치하고 있다. 또한 본 연구에서 3차원 절대변위의 각 요소인 L(종방향 변위), C(연직방향 변위), S(횡방향 변위)는 터널단면 각 측점에서의 경향선을 나타낸다. 그림 2는 다음절에 제시한 수치해석기법에 의해 구한 균질한 지반에서 굴착에 의한 터널 천단의 침하에 대한 영향선 및 경향선이다.

그림 3의 L, C, S는 경향선에 의해 구해지는

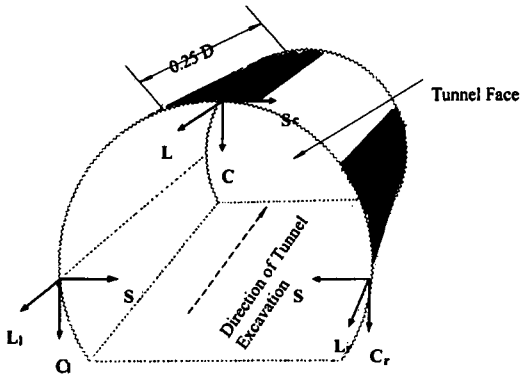


그림 3. 3차원 절대변위의 각 방향 요소

한 측점에서 3차원 절대변위의 각 계측점에서의 변위요소로써 각각 종방향 변위, 연직변위, 횡방향 변위를 나타내고 첨자(c, l, r)는 각각 터널단면에서의 천단, 좌측벽, 우측벽을 가리킨다. 여기서 각각의 화살표 방향으로의 변위를 양(+)으로 하였다. 3차원 변위의 변화양상을 2차원 평면상에서 표시하기위하여 절리면의 표시와 동일한 방법으로 그림 4와 같이 평사투영도 상에 나타내었다. 여기서 1은 천단의 변위, 2와 3은 각각 좌측 및 우측벽의 변위이고 터널 굴진방향을 N으로 표기하였다.

3. 파쇄대 예측을 위한 터널 모델링

3.1 해석기법

터널이 굴착됨에 따라 파쇄대 근처에서의 아칭효과에 의해 발생하는 변위의 변화에 대한 초기 지중응력의 영향을 알아보기 위하여 유한요소와 경계요소의 조합인 혼합법을 사용한 프로그램 *BEFE*(Computer Software & Services International, Austria)를 이용하였다. 이 프로그램은 복잡한 지반의 모델링이 가능하고 탄성 및 점소성의 해석이 가능하며 복잡한 시공 단계의 묘사가 가능하다. 불연속면은 경계요소에 의해 자유롭게 모사가 가능하고, 초기 지중응력을 현장조

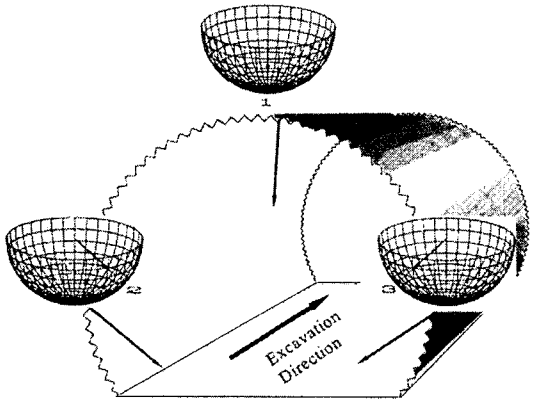


그림 4. 3차원 절대변위의 평사투영

표 1. 지반 특성치

	경 암 (intact rock)	경 암 (mass)	파 쇄 대 (fault zone)
탄성계수, E(t/m^2)	2,000,000	500,000	50,000
포아슨 비, ν	0.20	0.15	0.30
점착력, c(t/m^2)	200	50	10
마찰각, φ(°)	45	45	30

건에 부합하도록 여러 가지 형태로 입력가능하다. 본 연구에서는 혼합법이 사용되었는데, 터널 굴착면으로부터 2.5D까지는 유한요소로 모델링하였고 이 유한요소의 주위로 무한영역을 모사하는 경계요소가 둘러싸고 있는 형태로 모델링하였다. 이 방법은 경계조건을 제한할 필요가 없고 동일한 조건을 유한요소법으로 모델링하는 것보다 더 작은 수의 요소로써 정확한 모사가 가능하다. 지반은 2200여개의 절점과 900여개의 요소로써 모델링하였고, Mohr-Coulomb 파괴규준이 사용되었다. 지표면에서부터 터널 천단부까지는 45m로 가정하였고 변위의 일반적인 경향을 살펴보기 위하여 직경 10m의 원형터널로 모사하였다. 경암에서는 숏크리트가 지반의 변위에 미치는 영향이 그리 크지 않은 점을 고려하여 숏크리트는 모델링하지 않았다. 한 막장이 2.5m인 전단면 굴착으로 해석이 수행되었으며 3차원 mesh는 다음 그림 5와 같다.

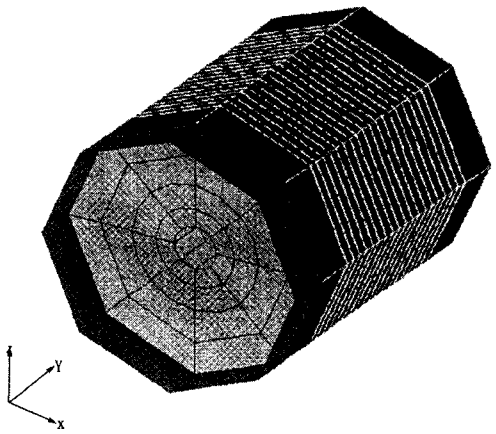


그림 5. 해석에 사용된 3차원 mesh

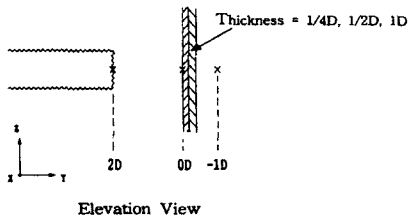
3.2 지반조건

해석에 사용된 지반의 특성치는 다음 표 1에 주진 바와 같으며 한국 지반공학회 터널분과위원회에서 제안한 값을 기준으로 사용하였다.

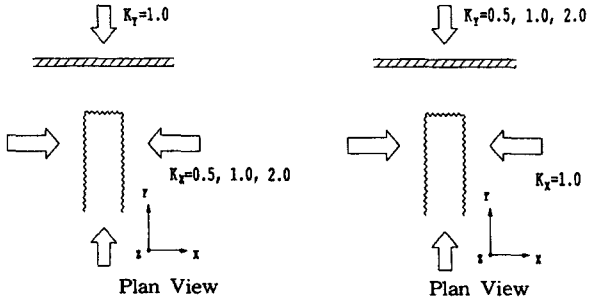
파쇄대의 탄성계수는 경암의 1/10이라고 가정하였고, 포아슨비는 경암의 2배라 가정하였다.

3.3 해석 case

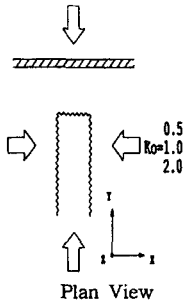
y축은 터널축 방향으로 가정했고(축방향), x축은 평면도에서 터널축에 직각인 방향으로 가정했으며(횡방향), z축은 측면도에서 수직방향으로 가정했다(연직방향). x, y 방향의 초기 횡방향 지중응력계수는 각각 K_X와 K_Y로 정했다. x, y, z방향의 변위는 각각 횡방향변위, 종방향변위, 침하라고 칭했다. 막장면 전방에 파쇄대가 존재할 경우의 3차원 절대변위의 변화를 해석하기 위하여, 그림 6에서 보인 바와 같이 다음 5가지 경우에 대하여 해석을 실시하였다.



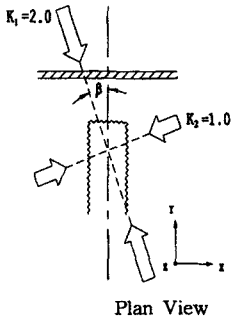
Case 1; 파쇄대 두께의 영향



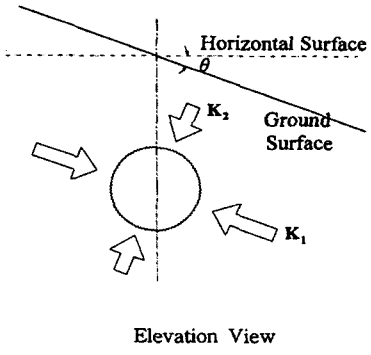
Case 2; K_X 및 K_Y의 영향



Case 3; K_O의 영향

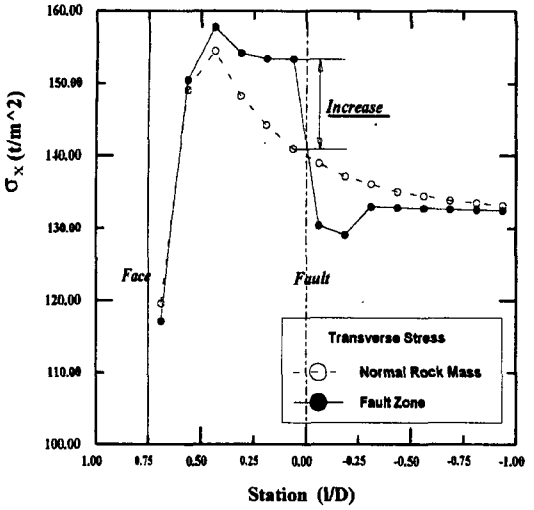


Case 4; β의 영향

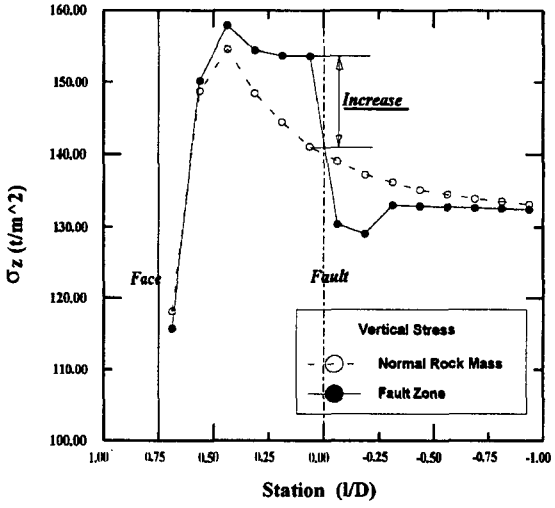


Case 5; 지표면 경사의 영향

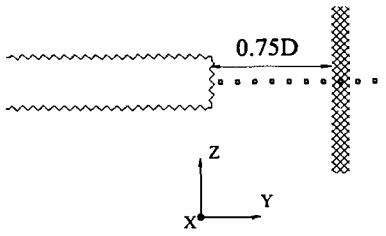
그림 6. 해석 case



(a) 횡방향 응력(σ_x)



(b) 연직방향 응력(σ_z)



(c) 응력 측정위치 및 응력성분

그림 7. 막장면이 0.75D에 위치할 때 터널축을 따른 응력분포 (K_o = 1.0인 경우)

Case 1은 파쇄대의 두께가 각각 0.25D, 0.5D, 1.0D일 경우에 대하여 파쇄대의 두께에 의한 영향을 살펴보았다. *Case* 2는 수평방향 초기 지중응력의 크기가 양방향이 서로 다를 경우에 대하여 해석을 실시하였고, *Case* 3은 수평방향 초기 지중응력의 계수가 양방향(x,y)으로 서로 동일할 경우(K_o)에 대하여 그 크기가 달라질 경우에 대하여 해석을 실시하였다. *Case* 4에서는 수평방향 최대 주응력의 방향이 터널축과 일치하지 않고 일정한 각도를 이루고 있을 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 마지막으로 *Case* 5에서는 지표면이 수평으로 존재하지 않고 기울어져 있을 경우에 대하여 해석을 실시하였다.

4. 수치해석결과의 고찰

4.1 파쇄대 존재시의 아칭

그림 7은 각각 균질한 지반과 파쇄대가 존재하는 지반에서 막장면이 파쇄대와의 거리가 0.75D일 때까지 굴착했을 때 아직 굴착이 이루어지지 않은 막장 전방 지반의 터널 중심축을 따라서 가우스 점(gauss point)들에서의 연직방향 응력 및 횡방향 응력을 plot한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 연직방향 및 횡방향 응력은 터널 전방에서 커져있다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 터널굴착시의 아칭현상을 잘 나타내고 있다. 균질한 지반에서 굴착하는 경우에 아칭에 의해 막장 전방에서의 증가하는 응력에 비하여 파쇄대가 존재하는 경우 연직방향 및 횡방향 응력의 증가가 크다. 따라서, 파쇄대가 존재하는 경우 막장면과 파쇄대사이 지반에서의 응력이 일반적인 응력의 집중보다 더욱 가중됨을 알 수 있다. 파쇄대 존재시 이러한 막장전방의 응력증가로 터널의 종방향 변위(L)가 더욱 커지게 된다.

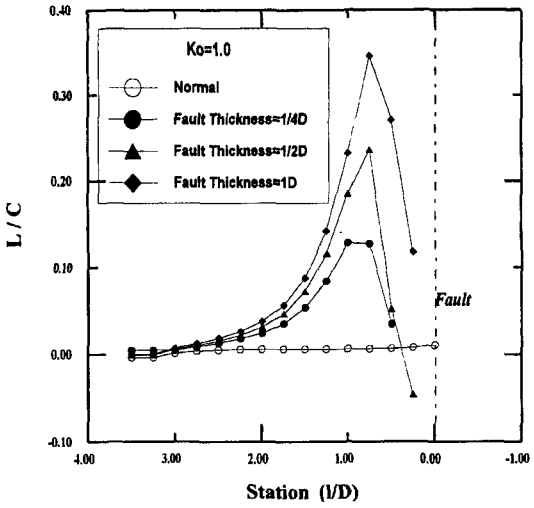


그림 8. 파쇄대 두께에 따른 L/C의 변화 (K_O = 1.0)

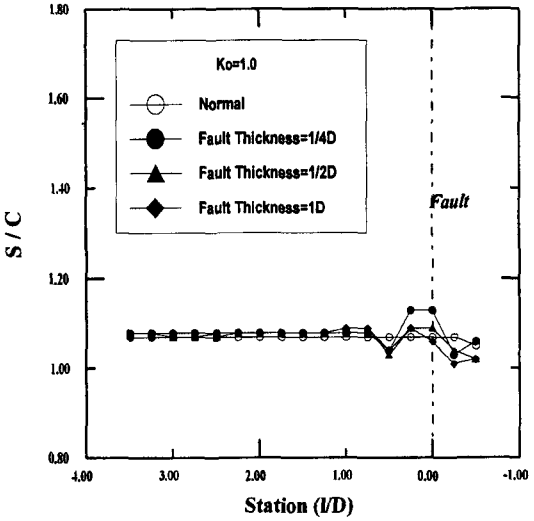


그림 9. 파쇄대의 두께에 따른 S/C의 변화(K_O = 1.0)

4.2 파쇄대 두께의 영향

그림 8은 파쇄대의 두께가 각각 0.25D, 0.5D, 1.0D로 다를 경우에 대하여 L/C를 나타낸 것이다. 파쇄대의 두께가 커질수록 아칭에 대한 파쇄대의 효과가 더욱 커져서 L/C의 값이 더욱 커짐을 알 수 있다. 이는 파쇄대의 두께가 커질수록 파쇄대를 통해 전달되는 응력이 작아져서 막장면과 파쇄대 사이의 지반에 연직방향 및 횡방향 응력의 집중이 증가되고 이로인해 천단의 종방향변위(L)가 더욱 크게 증가하여 L/C가 크게 변화한 것으로 보인다. 따라서, 막장 전방에 파쇄대의 크기가 클수록 막장전방 지반변화예측이 더욱 용이해진다. 막장면이 파쇄대에 매우 근접하게 되면 침하의 증가가 커지게 되어 L/C는 오히려 감소되는 것으로 나타났으며, 이 등(1997)에 의해 연구된 바와 같이 낮은 강도의 지반에서 높은 강도의 지반으로 굴착해갈 경우 음의 L이 발생하는 것으로 나타났다.

다음 그림 9는 각 경우에 대한 S/C를 나타낸 것이다. 파쇄대의 두께나 초기응력의 크기의 변화에 관해서 S/C는 터널이 굴진함에 따라서 별

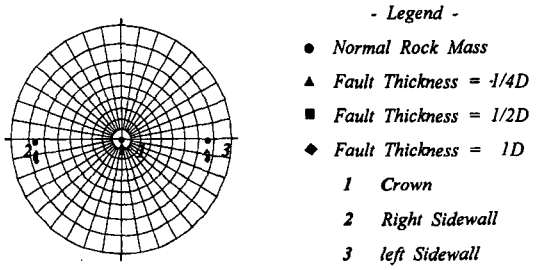


그림 10. 파쇄대의 두께에 따른 변위 벡터의 평사 투영도(K_O = 1.0, 막장면이 1.0D에 위치해 있을 때)

큰 차이를 보이지 않으므로 S/C의 변화로는 파쇄대의 존재를 파악하기가 어렵다. 파쇄대가 비스듬히 놓여있어서 횡방향 아칭이 많이 작용하게 되는 경우는 S/C의 변화로 파쇄대를 파악할 수가 있으나(이 등, 1997) 직각으로 놓여있는 파쇄대의 경우는 큰 변화를 보이지 않는다.

그림 10은 각 경우에 대하여 막장면이 1.0D에 위치해 있을 때의 평사투영도이다. 파쇄대의 두께가 두꺼울수록 반굴진방향으로 밀려오는 정도가 더욱 커지는데, 이는 전술한 바와 같이 파쇄대의 두께가 두꺼울수록 종방향 아칭에 많은 영향을 주어서 막장면과 파쇄대사이에 더욱 큰 응

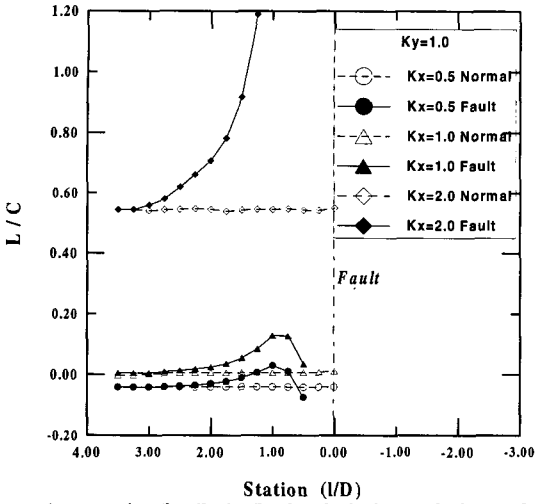


그림 11. L/C에 대한 초기 횡방향 응력의 효과

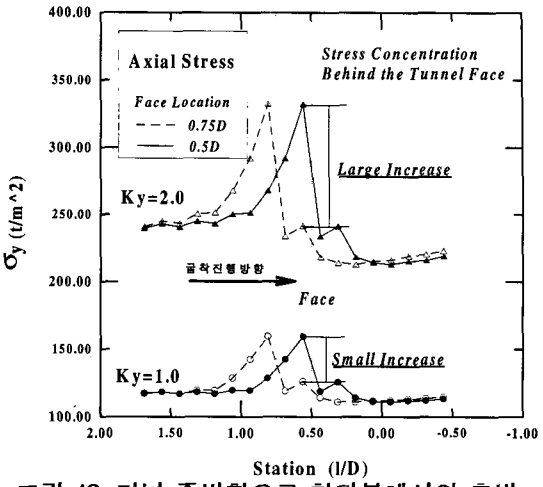


그림 12. 터널 종방향으로 천단부에서의 축방향 응력의 분포

력이 집중되어서 더욱 많은 종방향 변위가 발생하게 되기 때문이다.

4.3 횡방향 및 축방향 초기 응력의 영향

수평방향 초기 주응력의 크기가 서로 같지 않을 경우 즉, $K_X \neq K_Y$일 경우에는 굴착에 의한 영향이 이들의 비에 의해 결정될 것이다. 수평방향 초기 지중응력의 비등방성이 파쇄대의 예측에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 6의 *Case 2*와 같이 횡방향 초기주응력의 영향과 축방향 초기주응력의 영향에 대하여 각각 해석을 실시하였다.

2절에서 보인바와 같이 일정한 초기 축방향 응력에서 횡방향 응력이 커질수록 천단의 침하가 작아지고 막장전방으로 전이되는 응력의 크기가 더욱 증가하여 종방향 변위가 증가한다. 따라서, 균질한 지반에서 K_Y가 일정할 때 K_X가 커질수록 L이 커지고 C가 작아져서 L/C가 전체적으로 큰 값을 가지게 된다. 이미 보인바와 같이 파쇄대가 존재할 경우 종방향 변위는 증가한다. K_X가 클수록 막장면과 파쇄대사이의 횡방향 응력의 증가가 커지게 되어 K_X가 작은 경우보다 종방향 변위의 증가량이 커지게 되고, 따라서 파쇄대에 근접함에 따라 L/C의 변화도 증가한다. 그림 11은 파쇄대가 존재할 경우 서로 다른 초기 횡방향 응력 조건에서 L/C를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 파쇄대가 존재할 경우 K_X가 클수록 L/C의 증가량이 커진다. 이는 막장면 앞의 횡방향 응력 집중이 더욱 커지기 때문이다. 즉, 초기 횡방향 응력이 클수록, 그리고 K_X와 K_Y의 차가 클수록 L/C의 변화가 크고 뚜렷하여 파쇄대 예측이 용이해진다.

일정한 초기 횡방향 응력에서 축방향 응력이 커질수록 천단의 침하는 2절에 보인바와 같이 증가한다. 그리고, 그림 12와 같이 축방향 응력이 클수록 막장면에서 일정거리 뒤쪽(굴착된 곳의 천단부)의 축방향 응력 증가량이 커지기 때문에 종방향 변위는 작고 K_Y가 어떤값 이상이되면 음의 L(터널진행방향)이 발생한다. 따라서, 균질한 지반에서 K_X가 일정할 때 K_Y가 커질수록 L이 작고 C가 커져서 L/C가 전체적으로 작은 값을 가지게 된다. K_Y가 큰 경우에 파쇄대가 존재하면 파쇄대로 인한 막장 전방의 횡방향 및 연직방향 응력집중으로 균질한 지반에서보다 종방향 변위는 증가하나 그 양은 작다. 그림 13은 서로 다른

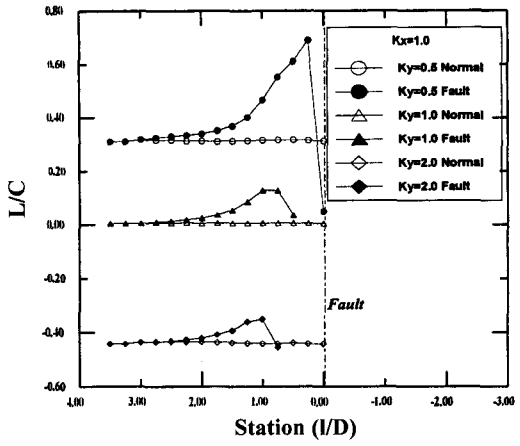


그림 13. L/C에 대한 초기 축방향 응력의 영향

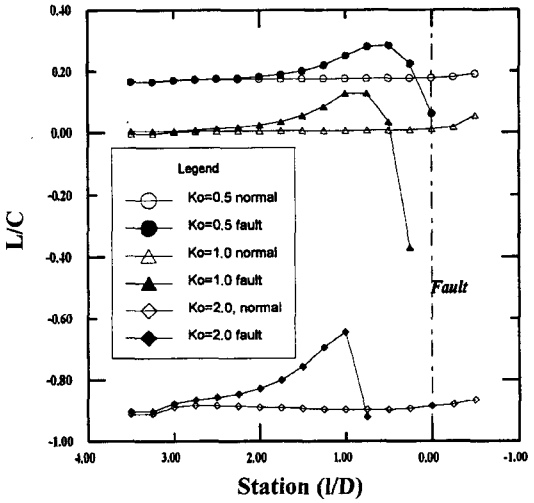


그림 14. 초기수평지중응력이 동일한 경우의 L/C

축방향 응력 조건에서의 L/C를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 파쇄대가 존재하는 경우 K_Y가 클수록 L/C의 변화는 크지 않다. 이는 파쇄대의 존재로 인한 막장 전방의 연직 및 횡방향 응력증가로 종방향 변위가 증가하지만, 큰 초기 축방향 응력의 효과로 인해 막장면 뒤의 축방향 응력이 증가하여 종방향 변위의 증가를 감소시키기 때문이다. 따라서, 초기 축방향 응력이 감소할수록 그리고, K_X와 K_Y의 차가 클수록 파쇄대로 인한 L/C의 변화가 커지고 파쇄대의 예측이 용이해짐을 알 수 있다.

4.4 K_O의 영향

균질한 지반에서 K_X가 커질수록 횡방향 응력이 커져서 침하(C)가 줄어들고 종방향 변위는 증가한다. 또한, K_Y가 증가할수록 임의의 계측점에서부터 측정한 천단에서의 침하는 증가하고 종방향 변위는 감소한다. 그 결과, K_O가 증가할수록 천단의 침하와 종방향 변위는 다소 감소하고 L/C가 감소한다. 그림 14는 파쇄대가 존재할 경우 동일한 지중응력에서 K_O가 0.5, 1.0, 2.0으로 변할 때의 L/C를 그린 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 파쇄대가 존재할 경우 L/C가 터널 막장면에서 약 2.0D 전에서부터 커짐을 알 수 있다. K_O가 커짐에 따라 L/C의 절대적인 값은 작아지나 L/C 변화의 상대적인 크기는 더욱 커져서 그 경향을 뚜렷하게 파악할 수 있고, 그 변화도 2.5D정도에서 발생하여 파쇄대의 존재를 보다 일찍 파악 할 수 있다.

4.5 수평 주응력 방향의 영향

본 절에서는 수평방향 주응력의 방향이 터널 축과 일치하지 않고 경사져 있을 경우 파쇄대 예측에 대한 영향을 살펴보았다. 평면상에서 터널 진행방향을 Y라 할 때 수평방향 최대 주응력과 Y가 이루는 예각을 β라 정의한다. K_1은 최대 수평방향응력 계수이고 K_2는 최소 수평방향응력 계수이다. K_1=2.0, K_2=1.0인 경우에 대하여 β를 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90°로 변화시켜서 해석을 실시하였다. 그림 15에 보이듯이 β가 증가할수록 L/C의 값이 증가한다. 이는 β가 증가할수록 횡방향 응력이 증가하고 축방향 응력이 감소하기 때문이다. β가 45보다 작을 때는 파쇄대로 인해 변화하는 L/C의 값이 거의 일정하다. β가

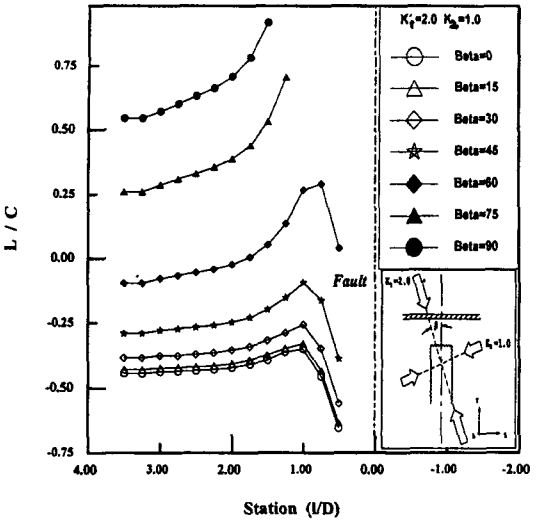


그림 15. β의 변화에 따른 L/C의 변화

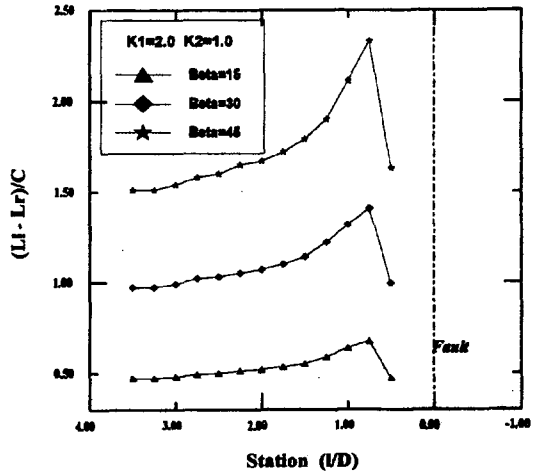


그림 16. β의 변화에 따른 (Ll-Lr)/C의 변화

45보다 클 경우는 L/C의 변화가 매우 커서 파쇄대의 예측이 용이해진다. β가 45°보다 작을 경우 L/C에 의한 파쇄대의 예측이 어렵게 된다. 이러한 경우 막장 전방의 파쇄대를 예측하기 위해 좌·우측벽의 종방향 변위의 경향선의 차(Ll-Lr)와 천단 침하(C)의 경향선을 이용하여 (Ll-Lr)/C를 plot하였다. 주응력이 경사져 있으므로 좌우 측벽의 응력이 동일하지 않고 변위양상도 다르게 된다. 이러한 경우 (Ll-Lr)/C의 상대적인 변화

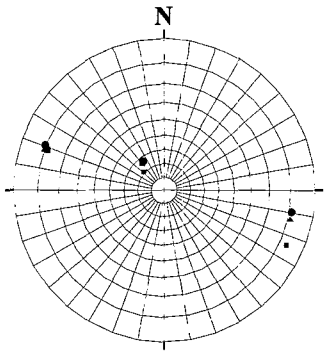


그림 17. β의 변화에 따른 평사투영도(β=30°)

폭이 L/C의 경우보다 크게되어 그림 16과 같이 (Ll-Lr)/C를 이용하여 보다 쉽게 파쇄대의 존재를 예측할 수 있게된다. 주응력의 방향이 터널축과 경사를 이루고 있는 경우 변위의 해석시 L/C와 (Ll-Lr)/C를 동시에 고려할 때 그 효과가 더욱 커지게 됨을 알 수 있다. 다음 그림 17은 수평초기주응력이 터널축과 경사져 있을 때의 평사투영도이다. β가 45보다 작은 경우는 측벽에서의 변위벡터의 이동이 천단에서의 변위벡터의 이동보다 크다. 따라서, 이러한 경우는 천단부 뿐만 아니라 측벽에서의 변위의 변화를 고려해서 파쇄대의 예측이 이루어져야 한다.

4.6 경사진 지반의 영향

본 절에서는 파쇄대 예측에 있어서 지표면 경사의 영향에 대하여 살펴보았다. 수평면과 지표면의 경사를 θ로 지정했고, 지표면이 수평이고 토피고가 45m인 Ko=2.0의 응력상태에서 θ가 변함에 따라 초기 주응력비을 동일하게 하면서 응력값의 전환(stress translation)에 의해 주응력 방향을 회전시켰다. 즉, K_1=2.0, K_2=1.0이고 K_1의 방향은 지표면의 경사와 일치하도록 하였다 (그림 6의 *Case* 5 참조). 그림 18에서와 같이 균질한 지반에서 θ가 증가함에 따라 수직방향응력이 증가하여 천단에서의 침하가 증가한다. 모

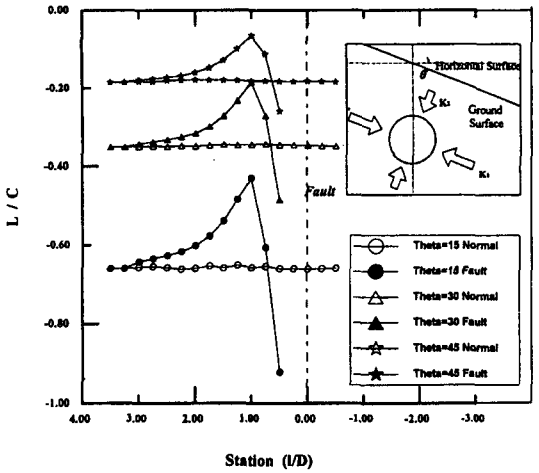


그림 18. L/C에 대한 지표면 경사의 영향

든 경우에 종방향 변위가 음의 값을 가지므로, θ 가 증가함에 따라 L/C가 커진다. 그리고, 파쇄대가 존재할 경우 θ 가 증가함에 따라 횡방향 응력이 작아지므로 L/C의 변화는 작다.

4.7 1차 지보재에 미치는 영향

3차원 유한요소법을 이용하여 여러 가지 초기 지중응력조건에서 파쇄대가 존재할 경우에 1차 지보재인 숏크리트에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 검토해 보았다. 시공순서, 무지보 굴착길이, 숏크리트와 암반과의 상대적인 강성, 터널의 형상 등의 여러 가지 다른 요소들은 일정하게 고정시키고 초기 지중응력만을 변화시켜가면서 이것의 영향을 알아보았다.

4.7.1 해석기법 및 해석 case

1차 지보재에 작용하는 응력을 알아보기 위하여 3차원 유한요소해석 프로그램인 *PENTAGON 3D*(Emerald Soft, Korea)를 사용하였고, 숏크리트는 3차원 shell 요소로 모델링 하였다. 지반은 연암으로 모사하였고 파쇄대는 연암의 1/10의 강성을 가지고 있는 것으로 가정했다. 암반, 파쇄대, 숏크리트의 특성치는 다음 표 2와 같다.

표 2. 지반과 숏크리트의 특성치

	연 암	파 쇄 대	숏크리트
탄성계수, E(t/m^2)	100,000	10,000	1,000,000
포아슨 비, ν	0.20	0.35	0.167
점착력, C (t/m^2)	10	5	-
마찰각, φ(°)	40	30	-

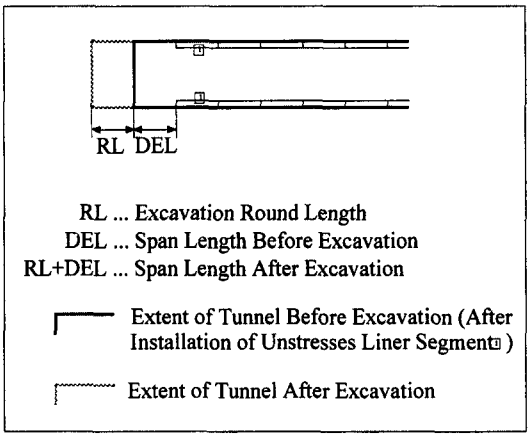


그림 19. 시공과정 모식도 (RL = 2.5m, DEL = 0m)

파쇄대가 존재하는 경우에 굴착에 의한 숏크리트에 작용하는 응력의 영향을 알아보기 위하여 다음 3가지의 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 우선, 초기 지중응력비가 변화하는 경우에 대하여 알아보았고, 두번째는 터널 축방향 응력의 크기에 따른 변화를 알아보았으며, 마지막으로 파쇄대 예측으로 지보패턴을 변경했을 때 숏크리트에 작용하는 응력이 어떻게 변화하는지에 대하여 살펴보았다.

4.7.2 해석 결과

숏크리트에 작용하는 응력의 경향은 시공순서에 따라 달라질수 있다. 본 연구에서는 숏크리트 설치의 지연길이가 0m이고 터널이 계속 굴착되어감에 따라 발생하는 응력의 재분배에 의하여 숏크리트에 작용하는 응력은 미리 설치된 곳에서 증가하게 된다(그림 19 참조). 이 응력은 막장면이 숏크리트 위치보다 1.5D 정도 더 굴진하게

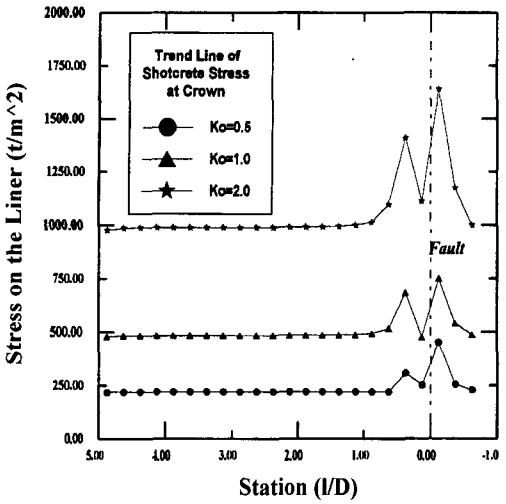


그림 20. 숏크리트에 작용하는 응력에 대한 K_O의 영향 (천단부)

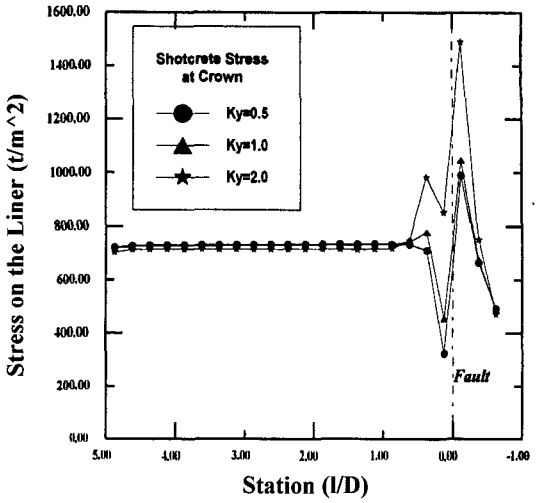


그림 21. 숏크리트에 작용하는 응력에 대한 초기 축방향 응력의 영향(천단부)

되면 어떤 일정한 값으로 수렴하게 된다. 파쇄대가 존재할 경우에는 막장면 근처에서의 응력집중이 더욱 심화되어서 이러한 지역에서의 숏크리트에 작용하는 응력은 터널이 파쇄대에 근접함에 따라 커지게 된다.

그림 20은 파쇄대가 존재하고 K_O가 다른 경우에 터널굴착에 의해 숏크리트에 발생하는 응력의 2.5m 경향선을 나타낸 것이다(막장면의 위치는 각 점들보다 2.5m 전방에 위치한다). 굴착면이 파쇄대에 닿았을 때 많은 변위가 발생하고 응력 재분배가 일어나는데 숏크리트는 한 막장 뒤에 설치되어 있으므로 이 곳의 숏크리트 응력은 증가하게 되고, 파쇄대 구간을 굴착하는 동안 발생하는 응력의 이완은 다소 작아져서 파쇄대에 접해있는 숏크리트의 응력이 작게 나타났다. 실제 시공은 응력 변화가 연속적으로 이루어지므로 본 결과와 일치한다고 할 수는 없으나 파쇄대 근처 숏크리트가 큰 하중을 부담한다는 경향은 일치할 것이다.

K_O가 증가할수록 숏크리트에 작용하는 하중이 클 뿐만 아니라 파쇄대로 인해 증가하는 응력이 커진다. 이와 같이 숏크리트에 작용하는 응력은 지반의 초기 지중응력에 밀접한 관계가 있고 파쇄대로 인한 영향이 크기 때문에 지반의 초기 지중응력의 평가와 파쇄대의 예측이 중요하다.

초기 축방향 응력이 서로 다를 때 천단부의 숏크리트에 작용하는 응력에 대한 영향선을 그림 20에 나타냈다. 이때 터널의 막장은 -1.0D에 위치해있다. 균질한 지반에서 초기 축방향 응력의 크기에 따른 숏크리트에 작용하는 응력의 크기에는 별 차이가 없다. 그러나, 파쇄대가 존재할 경우 초기 축방향 응력이 클수록 숏크리트에 작용하게 되는 응력의 크기는 더욱 커지게 된다. 초기 축방향 응력이 클수록 변위계측에 의한 파쇄대의 예측 및 지보패턴 변경이 더욱 중요해 진다.

막장 전방에 파쇄대가 존재할 때 파쇄대의 예측이 실행되지 않고 계속해서 굴착이 진행되면 숏크리트는 큰 하중을 겪게 되고 터널은 불안정해진다. 터널의 3차원 절대변위가 계측되면 파쇄대 위치에서보다 약 2.0D전방에서 그 존재가 예측된다. 만약, 지보패턴이 파쇄대 위치보다 2.0D 전에 바뀌면 숏크리트에 작용하게 되는 응력은 작아지고 터널은 안정하게 될 것이다. 그림 21은 지보패턴이 바뀌었을 경우와 그렇지 않았을 경

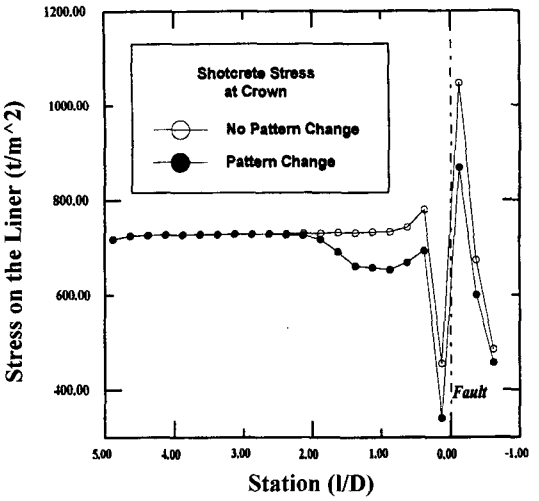


그림 22. 숏크리트에 작용하는 응력에 대한 지보패턴의 영향(천단부)

우에 대하여 -1.0D까지 굴착되었을 때 천단부의 숏크리트에 작용하는 응력을 plot 한 것이다. 이 경우에 K_o는 모두 1.0일 때이다. 지보패턴은 파쇄대의 위치에서 1.5D 전방에서 숏크리트의 두께가 10 cm에서 20 cm로 바뀌는 것으로 하였다. 지보패턴이 바뀌지 않았을 때는 1047 t/m^2이고 지보패턴을 바꿨을 때는 868 t/m^2로 감소하였다. 따라서, 3차원 변위계측에 의한 파쇄대의 예측이 터널의 안전한 시공에 도움을 준다는 것이 확인되었다.

5. 결 론

3차원 수치해석에 의하여 막장전방의 파쇄대 예측 및 파쇄대 존재시 숏크리트에 작용하는 하중에 대한 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 파쇄대가 존재할 경우 아칭효과로 인하여 파쇄대가 존재하지 않는 균질한 지반에 비하여 막장전방의 연직방향 및 횡방향 응력의 큰 증가로 인한 종방향 변위의 변화 때문에 터널이 파쇄대에 근접함에 따라 L/C가 증가하게 된다.
2) 파쇄대의 두께가 커짐에 따라 파쇄대로 전달되는 응력의 크기가 더욱 작아지게 되므로 L/C의 변화도 커지게 되어 파쇄대의 예측은 보다 쉬워진다.
3) 횡방향 초기 지중응력이 클수록 L/C의 변화가 크고 일찍 변화하기 시작한다. 횡방향 초기 지중응력이 클수록 막장면과 파쇄대사이의 응력집중이 커지게 되어 종방향 변위가 커지기 때문이다. 축방향 초기 지중응력이 작을수록 L/C의 변화가 크고 일찍 변화하기 시작한다. 축방향 초기 지중응력이 작을수록 파쇄대로 인한 막장면 뒤쪽의 축방향 응력의 증가량이 작아져서 종방향 변위의 증가가 커지기 때문이다.
4) 수평방향 초기 지중응력비(K_o)가 커질수록 파쇄대가 존재할 경우 L/C는 보다 일찍 변화하기 시작하며 L/C의 변화량도 크다. 따라서, K_o가 클수록 파쇄대의 예측이 용이하다.
5) 수평방향 주응력의 방향과 터널축이 이루는 각도(β)가 증가할수록 L/C의 변화가 증가한다. β가 45°보다 작을 경우 (Ll-Lr)/C가 파쇄대 예측을 위한 좋은 수단이 된다. 이는 초기 횡방향 주응력의 방향이 터널축과 일치하지 않을 경우 좌우 측벽의 종방향 변위의 변화가 서로 다르기 때문이다. 따라서, 초기 횡방향 응력의 방향이 터널축과 일치하지 않을 경우 L/C와 (Ll-Lr)/C를 동시에 고려하고 평사투영도에서 측벽 변위의 변화를 고려하면 파쇄대의 예측에 더욱 효과적이다.
6) 파쇄대로 인하여 강한 암에 응력이 더욱 증가한다. 이러한 과도한 응력은 지보재의 안정성을 저해하는 요소가 된다. 만약, 터널이 파쇄대와 만나기 전에 지보패턴을 변화시킨다면 숏크리트에 작용하는 응력을 안정한 값으로 줄일수 있다. 따라서, 터널이 파쇄대와 만나기 전에 파쇄대 근처의 강한 암에 보다 강한

지보가 필요하게 된다.

감사의 글

본 연구는 코오롱 건설(주)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 이인모, 손영진, 박광준, 강기돈 (1996), "터널 막장 전방의 지반변화 예측에 관한 연구", *'97 봄 학술 발표회 논문집*, pp. 103～112.
2. Kim, D. H. (1998), "3-dimensional Tunnel Analyses for the Prediction of Fault Zones and the Estimation of Lining Loads", M.Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Korea University.
3. Baudendistel, M. (1985), "Significance of the Unsupported Span in Tunnelling", *Tunnelling '85, Session 4*, pp. 103～108.
4. Bieniawski, Z. T. (1984), *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, A. A. Balkema.
5. Kim, H. J. (1997), Estimation for Tunnel Lining Loads, Ph.D thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.
6. Lo, K. Y., Lukajic, B., and Ogawa, T. (1984), "Interpretation of Field Measurements of Stress and Displacement around Excavations in rocks", *Proc. Geotech '84*, ASCE, pp. 128～155.
7. Lunardi, P. (1995), "Preconfinement of an Excavation in Relation to New Orientations towards the Design and Construction of Tunnels", *Periodico della Società Italiana Gallerie, Anno* XVII-N. 45, pp. 16～37.
8. Pelli, F., Kaiser, P. K., and Morgenstern, N. R. (1991), "The Influence of Near Face Behaviour on Monitoring of Deep Tunnels" , *Canadian Geotech. J.* Vol. 28, pp. 226～238.
9. Pelli, F., Kaiser, P. K., and Morgenstern, N. R. (1991), "An Interpretation of Ground Movements Recorded during Construction of the Donkin-Morien Tunnel", *Canadian Geotech. J.* Vol. 28, pp. 239～254.
10. Rabensteiner, K. (1996), "Advanced Tunnel Surveying and Monitoring", *Felsbau*, Vol. 14, Nr. 2.
11. Schubert, W. and Budil, A. (1996), "The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation", *8th International Congress on Rock Mechanics*, Vol. 3.
12. Schubert, W. and Steindorfer, A. (1996), "Selective Displacement Monitoring during Tunnel Excavation", *Felsbau*, Vol. 14, Nr. 2.
13. Steindorfer, A. (1998), "Short Term Prediction of Rock Mass Behavior in Tunnelling by Advanced Analysis of Displacement Monitoring Data", Ph.D thesis. Department of Civil Engineering, Technical University Graz.

(접수일자 1999. 2. 8)