절리암반사면 굴착시 기존터널의 변형특성

Deformation of Tunnel Affected by Adjacent Slope Excavation in a Joint Rock Mass

이진욱*　　이상덕**

Lee, Jin Wook　　Lee, Sang Duk

ABSTRACT

Behavior of the existing tunnel in the jointed rocks was affected by the adjacent slope excavation. In this study, large scale model tests were conducted. To investigate the tunnel distortion depending on the excavated slope angle and the joint dip of the ground performed model tests were numerically back analyzed. Consequently, as the joint dip and slope angle became larger, the tunnel distortion was tended to be larger. Ground displacement was also greatly dependent on the joint dip and the excavated slope angle, which indicated the possibility of the optimal slope reinforcement

절리암반에서 기존 터널에 근접하여 사면을 굴착하면 터널의 거동은 절리와 사면의 경사에 따라 영향을 받는다. 본 연구에서는 실대형 실험을 실시하여 터널에 근접하여 사면을 굴착시 사면각도와 절리각도에 따른 터널의 내공변위, 터널 라이닝의 부재력 등의 특성을 분석하였다. 분석결과 절리각도와 사면각도가 크면 클수록, 터널 내공변위와 모멘트는 커지는 경향이 있으며, 절리각도와 사면각도에 따라 지중변위 크기와 방향이 다르게 나타나고 있어 향후 사면보강에 있어 효율적 방안제시가 가능할 것이다

1. 서론

철도터널에 근접하여 도로 또는 다른 구조물을 건설하기 위해 사면을 굴착할 때, 사면의 안전성뿐만 아니라 터널의 안정성도 같이 검토해야 한다. 이는 사면굴착이 기존 터널주위 지반에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 특히 절리암반상의 터널에서는 이러한 문제가 더욱 심각해 질 수 있으며, 때때로 기존터널을 관통하여 사면파괴가 발생하는 경우도 있다. 따라서 사면굴착과 기존터널의 안전성은 암반의 절리상태, 사면상태 그리고 사면보강방법을 동시에 분석하여야 한다. 그러나 터널과 사면에 대해서 동시에 안전성 분석을 수행한 사례는 찾아보기가 힘들며 균질한 지반에 적합한 한정된 연구 또는 절리암반상의 터널굴착시 거동에 대한 연구가 일부 수행되었다.

B.Shen(1997)은 절리암반상의 터널주변 절리간격과, 크기, 형상 등이 터널과 주변지반 거동에 미치는 영향을 UDEC을 이용하여 분석하였으며, P. Jia(2005) 등은 절리각과 수평압력계수가 절리암반상의 터널에 미치는 영향을 수치해석으로 분석하였다. Lee(2004) 등은 절리지반에서 굴착되는 터널의 거동특성을 실대형 실험을 통하여 분석하였다.

본 논문에서는 절리암반상의 기존터널에 근접하여 사면을 굴착할 때 사면굴착과 터널변형과의 상관관계를 파악하기 위하여 실대형 실험을 수행하였다. 실대형 모형시험장치는 평면변형상태를 유지할 수 있도록 제작되어 있으며 (3.1m*3.1m*0.50m(폭*높이*길이)), 콘크리트 블록을 사용하여 절리를 모사하였으며 터널은 1/10축척(직경 0.6m)으로

† 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원
E-mail : jinugi@krri.re.kr
Tel : (031)460-5307　FAX : (031)460-5319
* 정회원, 아주대학교 건설환경시스템공학과 교수

제작하였다. 사면굴착면과 터널까지의 거리는 터널의 직경과 같은 0.6m로 고정하였으며 절리각도는 수평에서 수직까지 변화가 가능하고 또한 굴착사면 각도는60°, 75°, 90°로 변경하여 실험을 수행하였다.

2. 실대형 모형실험

절리암반상에 있는 터널에 근접하여 지반을 굴착할 때에 절리각도와 굴착사면경사에 따른 기존터널의 거동을 분석하기 위하여 실대형 실험을 수행하였다. 실대형실험은 크기가 3.1m*3.1m*0.5m(폭*높이*길이)인 2축 재하장치에서 실시하였다. 실제 절리암반과 유사한 모형지반을 모사하기 위해 일정크기의 블록을 제작, 조적하여 지반을 조성하였으며 터널은 평면 변형률 조건을 만족시키는 조건에서 강재라이닝을 설치하여 모사하였다. 터널은 굴착면에서 터널의 직경 D만큼 떨어져 위치하였으며, 절리면 경사는 0°에서부터 90°까지 30°씩 다르게 하였다. 또한 4가지 절리경사에 대해 사면굴착 경사를 세가지로 변경시켰으며, 사면을 굴착하면서 기존터널의 거동을 측정하여 분석하였다.

2.1 모델지반

실제 절리암반과 유사한 모형지반을 모사하기 위하여 크기가 15cm(가로)*20cm(세로)*47cm(길이)인 블록을 사용하여 규칙적인 주절리를 갖는 지반을 조성하였다. 실제 현장상태에서는 국부적인 절리가 존재할 수 있으나 실험에서는 규칙적인 주절리가 존재하는 형태로 지반을 조성하였다. 모델지반은 RMR=65인 양호한 상태에 해당된다.

모형지반의 측면과 바닥 경계는 그림 2에 나타난 바와 같이 마찰을 최소화하기 위하여 실험장치의 좌우면과 하면에 그리스를 바른 롤러와 철판을 설치하였다.

2.2 모형실험

절리암반에 위치한 터널에 근접하여 사면을 굴착함에 따른 터널의 거동특성을 분석하기 위하여 모형터널의 크기와 두께는 연구대상 터널과 모형터널의 상대강성이 동일하도록 상사율을 계산하여 결정하였다. 모형지반은 절리각도를 0°, 30°, 60°, 90° 4가지로 하였으며, 각 절리각도에 대해 각도가 90°, 75°, 60°로 되도록 사면굴착하였다. 총 12case의 시험 중 J60S75 case와 J60S90 case는 절리각도가 블록의 마찰각보다 커서 시험이 불가능 하였다.

표 1. 시험 종류

절리각도	0°			30°			60°	90°		
사면경사	60°	75°	90°	60°	75°	90°	60°	60°	75°	90°
실 험 명	J0S60	J0S75	J0S90	J30S60	J30S75	J30S90	J60S60	J90S60	J90S75	J90S90

그림 1. 실대형 2축 재하시험기

그림 2. 경계조건

2.3 터널모델

대형모형시험에서 모형터널은 길이에 대한 대응비가 실제 터널크기의 1/10 축척으로 하였고 모형터널 라이닝의 두께는 지반과 라이닝의 강성비를 이용하여 Duddeck and Erdmann (1985)의 방법으로 결정하였다. 실제 연구대상 터널과 모형 터널의 강성비는 지반의 강성과 터널라이닝 제원에 따라 다음 식으로 나타낼 수 있다.

실제 연구대상 터널의 강성비 ;

$$\alpha = \frac{E_k R^3}{E_b I_b} \tag{1}$$

모형터널의 강성비 ;

$$\alpha = \frac{E_{km} R^3{}_m}{E_{bm} I_{bm}} \tag{2}$$

여기서 첨자 m = 모형터널

E_k (E_{km}) = Young's Modulus of Ground (kPa)

R (R_m) = Radius of Tunnel (m)

E_b (E_{bm}) = Young's Modulus Lining (kP)

I_b (I_{bm}) = Moment of Inertia of Tunnel Lining (m)

모형터널 라이닝의 두께는 연구대상 터널과 모형터널의 상대강성을 동일하게 하는 방법으로 다음식으로부터 계산할 수 있다. (Soliman et al. 1993).

$$\alpha = \frac{E_k R^3}{E_b I_b} \equiv \frac{E_{km} R^3{}_m}{E_{bm} I_{bm}} = \frac{E_{km} R_m{}^3}{E_{bm} b t_m{}^3 / 12}$$

여기서 t (t_m) = Thickness of tunnel lining (m)

$$t_m = \left(\frac{12 E_{km} R_m{}^3}{a E_{bm}} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

실제 지반의 탄성계수(E_k)는 5,000㎫이고 모형 지반의 탄성계수(E_{km})는 400㎫이다. 직경 0.6m인 모형터널 라이닝은 두께 6㎜인 철판을 사용하였으며 이는 0.3m의 콘크리트 라이닝과 같다. Hobbs(1966)는 물체에 작용하는 중력가속도는 항상 일정하다는 가정하에 중력가속도의 가속도 축소율을 1.0으로 하고 시간의 축소율을 산정하였다. 이를 위해 먼저 길이에 대한 축소율을 정한후 시간, 밀도, 응력 등의 축소율을 차례로 산정하며 질량, 시간, 가속도 기준의 상사법칙을 적용하였다. 본 연구에서 터널라이닝은 축소율이 1/10이고 철판의 단위중량 78kN/m^3 을 적용하여 축소율을 산정하였다.

2.4 계측항목 및 위치

터널의 내공변위(8개소), 라이닝의 부재력(32개소)를 모형시험에서 지반을 굴착하면서 계측하였다. 계측항목과 위치도는 그림 3과 같다. 터널라이닝의 부재력과 수평 지중응력은 변형률 게이지(Strain gauge)를 사용하여 측정하였으며 Tokyo Sokki사의 TDS-302 데이터 로거를 사용하여 저장하였다.

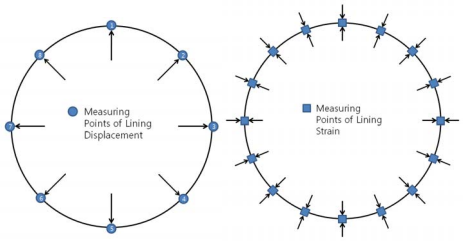


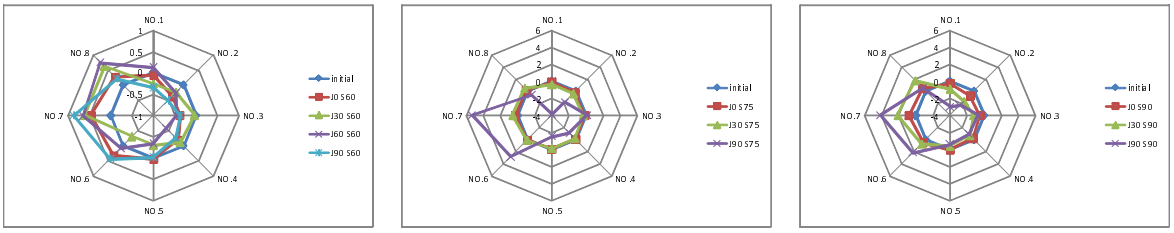
그림 3. 모형실험 터널변형 및 응력 측정위치

3. 시험결과 분석

3.1 터널 변형

모형 시험결과 절리각도에 따른 터널의 거동은 그림 4와 같다. 사면경사에 따라 약간의 차이는 있지만 터널의 내공변위는 사면굴착 방향인 터널 좌측 측벽부(NO.7)와 어깨부(No.8)에서 크게 나타났다. 절리각도가 커질수록 좌측 측벽부(NO.7)에서 터널 외측 변위가 크게 나타났다. 좌측 어깨부(No.8) 내공변위는 절리각도가 90°일 때가 가장 작게 발생을 하고, 사면굴착 반대방향(NO.2, NO.3, NO.4)에서는 터널 내측으로 변위가 발생하고 있다. 사면경사가 60°인 경우는 절리각도 0°, 30°, 그리고 60°에서는 좌측 어깨부(NO.8)의 터널변위가 크게 발생하였다. 또한 터널 천정부에서의 변위는 절리각도가 커질수록 터널 내측 방향으로의 변위가 많이 발생하는 경향을 보이고 있다.

사면의 경사가 60°일 경우 좌측 측벽부의 내공변위는 절리각도가 90°를 기준으로 0°일 때가 약 41.4%, 60° 일때가 74.7% 발생하고 있다. 사면의 경사가 75°일 경우에는 절리각도 90°를 기준으로 0° 일때가 5%, 60° 일때가 11.2% 발생하며, 사면의 경사가 90°일 경우에는 절리각도 90°를 기준으로 0° 일때가 20%, 60° 일때가 48.9% 발생하였다. 실험케이스별 최대 내공변위 위치는 표 2와 같다.



(a) 사면경사 60° (b) 사면경사 75° (c) 사면경사 90°

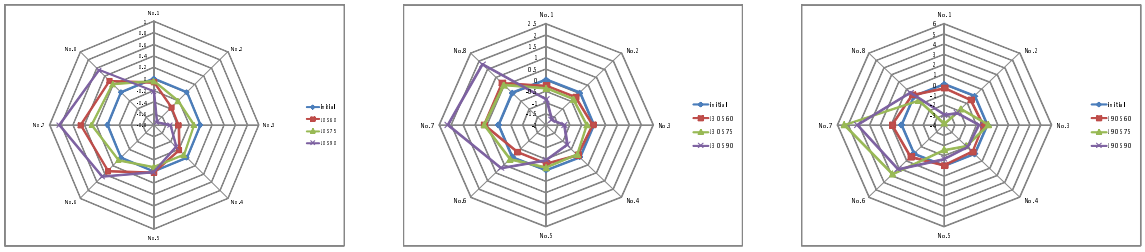
그림 4. 절리각도에 따른 터널 내공변위 특성

표 2. 실험케이스별 최대 내공변위 위치

	JOINT 0	JOINT 30	JOINT 60	JOINT 90
SLOPE 60	좌측벽(NO.7)	좌측어깨(NO.8)	좌측어깨(NO.8)	좌측벽(NO.7)
SLOPE 75	좌측벽(NO.7)	좌측벽(NO.7)		좌측벽(NO.7)
SLOPE 90	좌측벽(NO.7)	좌측벽(NO.7)		좌측벽(NO.7)

절리면에서의 사면경사 변화에 따른 터널의 내공변위 특성은 그림 5와 같다. 절리각도가 0°일 경우 좌측 측벽부의 내공변위는 사면각도가 90°일 경우를 기준으로 60°일 때가 43.4%, 75°일 때가 32.5% 발생

하고 있다. 절리각도가 30°일 경우 좌측측벽부의 내공변위는 사면각도가 90°일 경우를 기준으로 60°일 때가 30%, 75°일 때가 30% 발생하고 있으며, 절리각도가 90°일 경우 좌측 측벽부의 내공변위는 사면각도가 90°일 경우를 기준으로 60°일 때가 21%, 75° 일 때가 128.9% 발생하고 있다. 사면각도가 클수록 터널의 좌측 측벽부 내공변위가 증가하는 경향을 보이고 있으나, 절리각도가 90°일 때는 사면각도가 75°일 때가 90°일 때보다 조금 더 변위가 발생하는 것으로 나타난다. 사면각도가 크더라도 절리각도와 같은 경우에는 터널에 미치는 영향이 감소한다는 것을 알 수 있다.



(a) 절리각도 0° (b) 절리각도 30° (c) 절리각도 90°

그림 5. 사면경사에 따른 터널 내공변위 특성

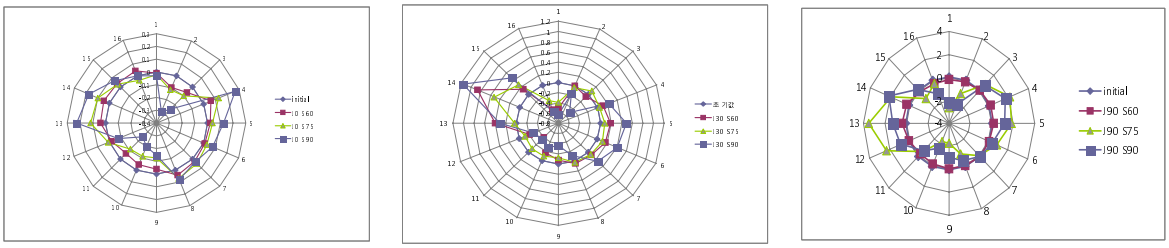
사면 굴착에 따라 사면굴착방향인 좌측 측벽부 수평변위는 점점 더 커지고 반대편 측벽부는 터널내부로의 수평변위가 점점 더 확대되는 경향을 보이고 있다.

3.2 라이닝 모멘트

절리면의 각도가 0°인 경우, 사면의 각도와 상관없이 터널의 양쪽 어깨부(NO.14, NO.4) 방향과 응력이 해방되는 사면굴착 방향인 좌측 측벽부(NO.13) 모멘트가 사면굴착에 따라 점점 커지는 경향을 보이고 있으며, 최종적으로는 사면각도 90°일 때 우측 어깨부(NO.4)에서의 모멘트값이 0.265KN·m, 천단에 가까운 우측 어깨부(NO.2)에서 -0.304KN·m로 나타난다.

절리면의 각도가 30°인 경우의 모멘트는 좌측 어깨부(NO.14) 방향이 증가하는데, 이는 굴착에 의해 절리면상의 블록의 미끄러짐과 사면굴착에 의한 응력 해방에 의해 발생한 것으로 판단된다. 사면각도가 90°일 때 가장 최대값은 1.156KN·m로 나타났다.

절리면의 각도가 90°인 경우는 사면의 경사가 60°와 75°인 경우는 측벽부 방향(NO.13)으로 모멘트가 증가하며, 90°인 경우는 측벽부 상단(NO.14) 방향의 모멘트가 증가하는 특성이 있다. 전반적으로 절리각도에 상관없이 사면의 경사가 커질수록 커지는 경향을 나타내고 있으나 사면의 각도와 절리의 각도가 같은 90°일 때는 사면각도 75°일 때보다 모멘트의 값이 조금 작은 경향이 나타나고 있다. 사면 굴착에 따른 측방응력이 구속상태에서 해방됨에 따라 좌측벽부(NO.13)와 좌측어깨(NO.14) 방향으로 모멘트가 증가하는 특성을 보이고 있다. 최대 모멘트값은 사면각도 75°일 때 3.469KN·m, 90°일 때 2.136KN·m로 나타났다



(a) 사면경사 60°　　(b) 사면경사 75°　　(c) 사면경사 90°

그림 6. 사면경사에 따른 터널 라이닝의 모멘트 특성

4. 결론

본 연구에서는 절리암반에서 터널에 근접하여 사면을 굴착할 때에 다양한 각도의(0°, 30°, 60°, 90°) 절리면을 갖는 지반에서 사면굴착 각도(60°, 75°, 90°)에 따라 기존 터널이 받는 영향을 파악하기 위하여 실대형시험을 수행하였으며, 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1) 터널의 내공변위는 동일한 사면각도에서 절리면의 각도가 클수록 크게 나타났으며, 사면굴착방향의 측벽부에서 많이 발생하였으며, 절리면의 각도가 90°인 경우는 터널 천정부에서도 많은 변위가 발생하였다.

2) 내공변위는 절리각도가 동일한 경우에는 사면각도가 클수록 많이 발생하지만, 절리각도 90°일 때 사면각도 90°인 경우에는 동일한 절리각도에서 사면각도 75°일 때가 90°일 때보다 내공변위와 모멘트 값이 더 크게 나타나는 특징이 있다.

3) 사면의 굴착단계에 따라 터널의 내공변위, 모멘트, 지중변위는 점차 증가하는 경향이 나타났다.

향후 굴착단계에 따른 터널내공변위와 터널의 부재력, 지중변위, 사면굴착면의 하중전이와의 상관관계를 분석하여 암반절리면에서의 사면굴착시 절리각도와 사면굴착각도에 따른 기존 터널의 안전성을 분석할 계획이다.

참고문헌

1. The German Society for Geotechnics. 2003. Recommendations on Excavations. Ernst & Sohn
2. Richard E. Goodman, 1989. Rock Mechanics(2ndEdition),JohnWiley&Sons
3. Duddeck, H. and Erdmann, J. 1985. On structural design models for tunnels in soft soil. Underground Space, Vol.9, Pergamon Press
4. 안성권 (2007) “Model tests Investigating the Interaction Between Closely Spaced Tunnels in Clay”, 박사학위논문, The University of Birmingham.
5. 이상덕 (2003). “최신터널공학의 이해” 아주대학 지반공학연구실.
6. 이상덕 (1998). “토질역학2nd Edition” Saeron Press.
7. 주영훈 (2003) “국부적인 지중응력집중에 의한 터널라이닝의 거동” 석사학위논문, 아주대학교.