

절리암반에서의 근접사면굴착에 의한 기존터널 거동에 대한 실험적 연구

이진욱^{1*}, 이상덕²

Experimental study on behavior of the existing tunnel due to adjacent slope excavation in a jointed rock mass

Jin-Wook Lee, Sang-Duk Lee

Abstract When a rock slope is excavated adjacent to a existing tunnel, the behavior of the existing tunnel in the jointed rock masses is greatly influenced by the joint conditions and slope status. In this study, the effects of joint dip and slope angle close to a tunnel are investigated through a large scale model using a biaxial test equipment (3.1 m x 3.1 m x 0.50 m (width x height x length)). The jointed rock masses were built by concrete blocks. The diameter of the modeled tunnel is 0.6 m and the dip angles of joint vary in the range of 0-90°. In addition, the excavated slope angle varies within 30-90°. Deformational behaviors of the tunnel were analyzed in consideration of joint dip and slope angle. With increase of the joint dip and slope angle, the magnitude of tunnel distortion and the moment of tunnel lining were increased. Rock mass displacement in horizontal was also dependent on the joint dip and the excavated slope angle, which indicated the optimal slope reinforcement for a specific rock mass conditions.

Keywords: Joint dip, adjacent slope excavation, jointed rock mass, large scale model test, tunnel behavior

요 지 절리암반에서 기존 터널에 근접하여 사면굴착시 터널의 거동은 절리와 굴착사면상태의 영향을 받는다. 본 논문에서는 기존터널에 근접하여 지반을 굴착시, 절리각도와 굴착사면 경사의 영향을 파악하기 위하여 2축 실험대형 모형시험장치(3.1 m*3.1 m*0.50 m(폭*높이*길이))를 이용한 시험을 수행하였다. 절리암반은 콘크리트 블록을 사용하여 모사하였으며 터널은 1/10축척(직경 0.6 m)으로 제작하였다. 절리각도는 0°부터 90°까지 변경이 가능하며, 굴착사면 경사는 30°에서부터 90°까지 가능하도록 되어 있다. 실험대형 시험을 통하여 절리각도와 사면경사에 따른 터널거동과 수평지중변위를 계측, 분석하였다. 분석결과 절리각도와 사면경사가 크면 클수록, 터널 내공변위와 터널 라이닝 모멘트가 커지는 경향이 있었으며 수평지중변위 또한 절리각도와 사면경사에 많은 영향을 받고 있어 향후 사면보강에 있어 효율적 방안제시를 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

주요어: 절리각도, 근접사면굴착, 절리암반, 실험대형 시험, 터널거동

1. 서 론

토지의 효율적 이용을 위하여 기존터널에 근접시공하는 사례가 많이 발생하고 있다. 근접시공에 의해 기존터널에 영향을 미치는 경우에는 터널의 병설 교차터널 시공, 터널상부의 성토와 절토, 터널측부의 굴착 등이 있다. 특히 기존 터널에 근접하여 도로, 철도 등의 교통인프라 시설이나 다른 구조물을 건설하기 위해 사면을 굴착할 때 지반손실을 발생시킴으로서 터널 주변 지반에서 소성영역이 확장되어 기존 터널에 영향을 미치게 된다. 이러한 영향을 최소화하기 위해 기존터널과 굴착사면과의 이격거리를 터널의 폭 이상으로 유지하도록 일

부 시방서 등에 권고안으로 제시되어 있으나 절리암반에서의 굴착은 절리상태에 따라 기존터널의 거동이 달라질 뿐만 아니라 굴착사면의 경사에 따라 지중변위 특성이 달라지므로 이를 고려한 특성을 분석하여야 한다. 그러나 기존터널에 근접하여 사면굴착시 사면경사와 절리상태를 동시에 고려한 연구사례가 미비하며 일부 등방성 지반에 대한 연구사례가 있다.

절리암반의 역학적 특성에 대한 실험적 연구는 주로 절리암반에서의 터널 굴착시 터널과 주변지반의 거동특성에 관한 연구가 수행되었다. Wu 등(2004)은 터널건설시 경사진 절리면의 거동특성을 분석하기 위하여 trap door 시험을 이용한 절리암반내의 터널굴착을 모사한

*정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (E-mail: jinugi@krii.re.kr)

²정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 (E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr)

실험을 수행하였다. 국내에서는 박승준 등(2004)은 절리지반에서 굴착되는 터널의 거동특성을 실험을 통해 분석하였으며, 변광욱 등(2005)은 모형실험과 수치해석적 방법을 통하여 절리암반에 굴착되는 터널의 거동을 연구하였다. 또한 정형래 등(2006) 이방성 압반의 방향성 및 축압조건이 터널 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 이방성 축소모형실험을 수행하였다.

절리면 지반에서의 건설은 현장 기술자 또는 등방성 지반의 연구결과를 준용하여 사용하는 경우가 종종 있다. 본 논문에서는 절리암반상의 기존터널에 근접하여 사면을 굴착할 때 절리각도와 굴착사면 경사가 기존터널에 미치는 영향을 검토하므로써 향후 절리암반상의 기존터널 근접시공시 터널의 안정성 확보방안 및 터널과 사면의 보강방안 도출시 기초자료로 활용하고자 한다.

기존터널에 근접하여 지반 굴착시, 절리각도와 굴착사면 경사의 영향을 파악하기 위하여 2축 실험 모형시험장치를 이용한 시험을 수행하였다. 터널의 거동은 평면 변형 특성이 있으므로 평면변형 상태를 유지할 수 있도록 실험 모형시험장치를 제작하였다. 콘크리트 블록을 사용하여 절리를 모사하였으며 터널은 1/10축척(직경 0.6 m)으로 제작하였다.

절리각도는 수평부터 수직까지 변경이 가능하며, 굴착사면 경사는 30°에서부터 90°까지 가능하도록 되어 있다.

2. 실험 모형시험

2.1 개요

절리암반에서 기존터널에 근접하여 지반 굴착시 절리각도와 사면굴착경사에 따른 기존터널의 거동을 분석하기 위하여 실험 모형시험을 수행하였다. 실험 모형시험은 크기 3.1 m*3.1 m*0.50 m(폭*높이*길이)인 2축 재하 시험기에서 실시하였다. 실제 절리암반과 유사한 지반을 모사하기 위해 일정크기의 콘크리트 블록을 제작, 조적하여 모형지반을 조성하였다. 터널은 평면 변형률 조건을 만족하도록 하였으며 굴착면에서 터널 경계면까지의 거리는 터널직경 D만큼 떨어져 위치시키고, 절리각도는 0°에서부터 90°까지 30° 차이로 변화시켰다. 또한 각각의 절리각도에 따라 사면굴착 경사를 세 가지로 변경시켰으며, 사면을 단계적으로 굴착하면서 기존터널과 주변지반의 거동을 계속하였다.

2.2 모델지반

실제 절리암반과 유사한 모형지반을 모사하기 위하여 크기 15 cm(가로)*20 cm(세로)*47 cm(길이)인 블록을 사용하여 규칙적인 주절리를 갖는 지반을 조성하였다. 실제 현장상태에서는 국부적인 절리가 존재할 수 있으나 시험에서는 규칙적인 주절리가 존재하는 형태로 지반을 조성하였다. 실내시험결과 블록의 마찰각은 31°이었으며, 모델지반은 RMR=65인 양호한 압반 상태에 해당된다.

모형지반의 측면과 바닥경계는 마찰을 최소화하기 위하여 시험장치의 좌측면과 하면에 그리스를 바른 롤러와 철판을 설치하였다.

2.3 모형터널

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 지반강성과 터널라이닝 제원에 따라 다음 식으로 나타낼 수 있다.

실제 연구대상 터널의 강성비

$$\alpha = \frac{E_k R^3}{E_b I_b} \quad (1)$$

모형터널의 강성비

$$\alpha = \frac{E_{km} R^3 m}{E_{bm} I_{bm}} \quad (2)$$

여기서 첨자 m = 모형터널

E_k (E_{km}) = 실제(모형)지반의 탄성계수(kPa)

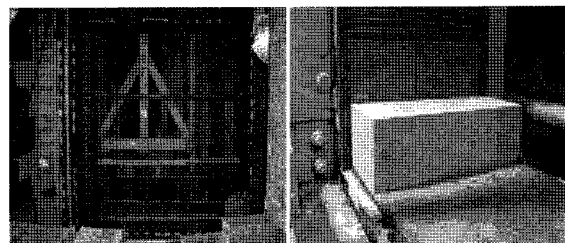


사진 1. 모형시험장치 및 블록

R (R_m) = 실제(모형) 터널반경(m)
 E_b (E_{bm}) = 실제(모형)라이닝 탄성계수(kPa)
 I_b (I_{bm}) = 실제(모형)라이닝 단위길이당 단면2차모멘트(t_m³/12)

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

$$\alpha = \frac{E_k R^3}{E_b I_b} = \frac{E_{km} R_m^3}{E_{bm} I_{bm}} = \frac{E_{km} R_m^3}{E_{bm} t_m^3 / 12} \quad (3)$$

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

$$t_m = \left(\frac{12 E_{km} R_m^3}{\alpha E_{bm}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

실제 지반의 탄성계수(E_k)는 5,000 MPa이고 모형 지반의 탄성계수(E_{km})는 400 MPa이다. 직경 0.6 m인 모형 터널 라이닝은 두께 6 mm인 철판을 사용하였으며 이는 0.3 m의 콘크리트 라이닝과 같다. Hobbs(1966)는 물체에 작용하는 중력가속도는 항상 일정하다는 가정하에 중력가속도의 가속도 축소율을 1.0으로 하고 시간의 축소율을 정한후 시간, 밀도, 응력 등의 축소율을 차례로 산정하며 질량, 가속도 기준의 상사법칙을 적용하였다. 상사율을 고려하여 별도의 하중재하를 하지 않고 블록의 자중만을 사용하여 시험을 수행하였다. 본 연구에서 터널 라이닝은 축소율이 1/10이고 철판의 단위중량 78 kN/m³을 적용하여 축소율을 산정한 결과는 표 1과 같다.

표 1. 대형시험 모델 축소율

Property	Dimensions	Reduction Rate (Tunnel Lining)
Length	[L]	1/10
Time	[T]	1/3.16
Weight	[M]	1/3,120
Density	[ML ⁻³]	1/3.12
Stress	[ML ⁻¹ T ⁻²]	1/31.24
Acceleration of Gravity	[LT ⁻²]	1.0

2.4 계측

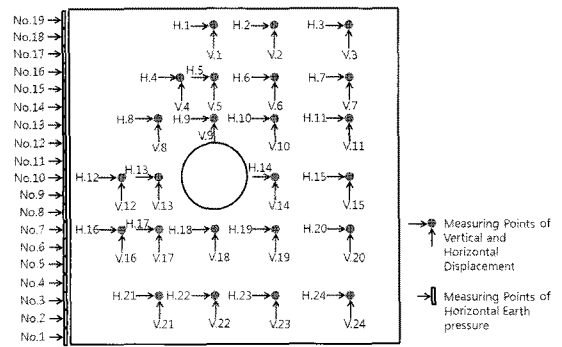
모형지반에서는 지반을 굴착하면서 터널의 내공변위(8개소), 터널라이닝의 부재력(32개소), 지중변위(24개소), 수평토압(19개소)을 계측하였다. 계측항목과 위치는 그림 1과 같다.

터널라이닝의 변위와 지중변위는 변위계(LVDT)를 사용하여 측정하였으며, 터널라이닝의 부재력과 수평압력은 변형률 게이지(Strain gauge)를 사용하여 측정하였고 데이터 로거는 Tokyo Sokki사의 TDS-302 데이터 로거를 사용하여 저장하였다.

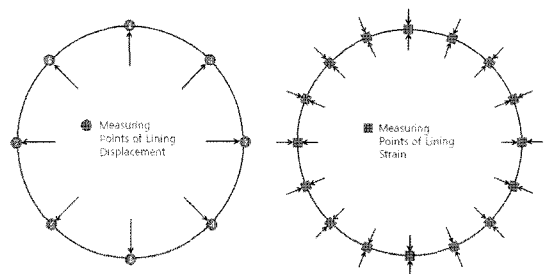
사면굴착방법은 지반조성 완료후, 시험기 좌측편에 설치되어 있는 잭을 상부에서부터 일정갯수를 푼 후 콘크리트 블록을 굴착사면 경사에 맞게 제거하므로써 굴착 단계를 모사하였다.

2.5 시험방법

모형지반의 절리각도는 0°, 30°, 60°, 90°의 4가지 경우로 방향성을 변화시켰으며, 각 절리각도에 대해 굴착



(a) 지중변위(LVDT) 및 수평응력(Strain gauge)



(b) 터널 내공변위(LVDT) 및 터널 부재력(Strain gauge)

그림 1. 계측기 설치 단면도

사면경사가 90°, 75°, 60°로 변화시키면서 시험을 수행하였다. 표 2에서와 같이 총 12case의 시험을 수행하였으나 J60S75 case와 J60S90 case는 블록의 마찰각보다 굴착사면 경사가 크게 되어 시험이 불가능 하여 그림 2와 같이 10가지 모형시험체를 사용하여 시험을 수행하였다.

대형모형시험의 순서는 다음과 같다.

- ① 시험기 하단에 경계조건을 만족시키기 위하여 구리를 바른 로울러, 간격재 및 강판 설치(사진 1)
- ② 사면굴착을 모사하기 위해 시험기 좌측면에 토압 측정장치를 부착한 잭(Jack) 설치(사진 2)
- ③ 절리면을 모사하기 위하여 콘크리트 블록을 절리 각도에 맞추어 조적(사진 3)
- ④ 바닥으로부터 1.5 m 위치에 모형 터널라이닝 설치

표 2. 시험케이스

Slope	Joint			
	Joint 0°	Joint 30°	Joint 60°	Joint 90°
Slope 60°	J0S60	J30S60	J60S60	J90S60
Slope 75°	J0S75	J30S75	X	J90S75
Slope 90°	J0S90	J30S90	X	J90S90

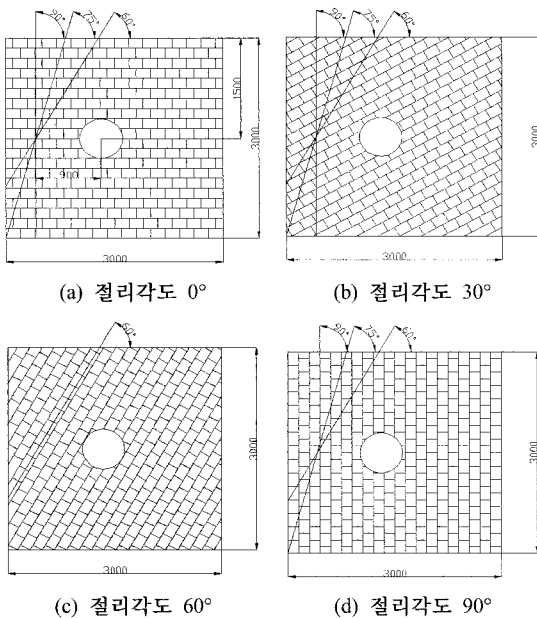


그림 2. 시험케이스

후 시험지반 조성 완료(사진 4)

- ⑤ 계측기 설치 및 데이터로거 연결후 각 계측기의 초기치 저장(사진 5)
- ⑥ 안정화 상태를 거쳐 1단계 사면굴착을 모사하기 위하여 시험장치 좌측면에 설치한 잭(Jack)을 상부에서부터 풀어 블록을 2단 제거 후 계측
- ⑦ 1단계 굴착과 동일하게 2단계 굴착을 실시하며 마지막 단계까지 단계별 굴착, 계측반복(사진 6)
- ⑧ 시험장치 하단까지 사면굴착 모사후 모형 절리압반 재조적

3. 시험결과 분석

3.1 터널 변형

대형모형시험 결과, 절리각도가 동일한 경우의 굴착사면 경사에 따른 터널변형은 그림 3과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 터널의 내공변위는 사면경사와 절리각도에

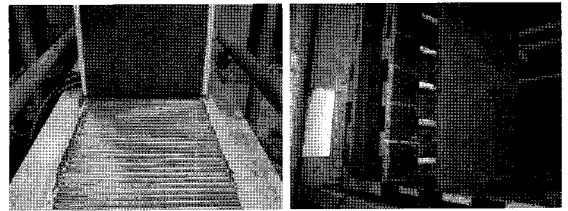


사진 1. 경계조건

사진 2. 토압측정장치 잭

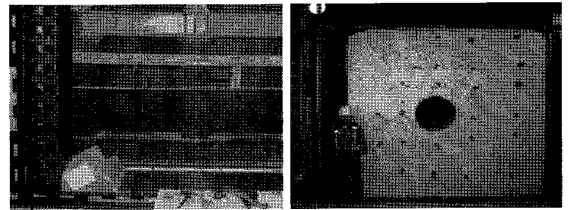


사진 3. 절리각도 조절

사진 4. 시험지반 조성

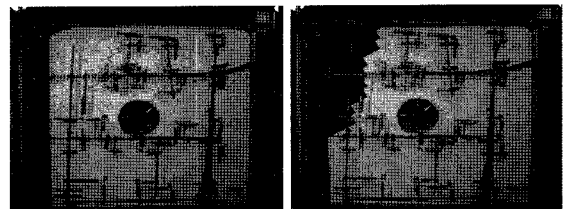


사진 5. 계측기 설치

사진 6. 사면굴착

상관없이 사면굴착 방향인 좌측벽부(No.7)에서 최고 값이 발생하였다. 절리각도가 0°인 경우, 좌측벽부(No.7)의 내공변위는 사면각도가 90°인 경우를 기준으로 사면각도 60°일 때 0.46 mm로서 55.4%, 75°일 때가 0.27 mm로 32.5%가 발생하였다. 절리각도가 30°인 경우, 좌측벽부(No.7)의 내공변위는 사면각도가 90°인 경우를 기준으로 60°일 때가 28.6%인 0.61 mm이고 75°일 때가 28.2%인 0.6 mm가 발생하였다. 절리각도가 90°인 경우, 좌측벽부(No.7)의 내공변위는 사면각도가 90°인 경우를 기준으로 60°일 때가 21%인 0.87 mm, 75°일 때가 128.9%인 5.35 mm가 발생하였다.

절리각도가 0°인 경우, 절리각도와 굴착사면경사에 상관없이 사면굴착방향인 터널 좌측편(No.6~No.8)에서 터널 내공변위가 터널외부로 확대 증가하고 터널 천정

부(No.1)를 포함한 터널 우측편(No.2~No.4)에서의 터널 내공변위는 터널내부로 축소 발생하여 전체적인 터널형상은 그림 5와 같다.

절리각도 0°인 경우의 또 다른 특징은 터널 바닥부(No.5)에서 굴착사면 경사에 따라 일부 축소변위가 발생을 하고 있지만 그 값이 매우 작아 거의 0에 가까운 값이 발생하였으며, 터널 천정부(No.1)에서의 변위도 굴착사면경사가 90°인 경우를 제외한 나머지 굴착사면 경사에서는 그 값이 거의 0에 가까운 값을 나타내고 있다는 점이다.

또한 굴착사면 경사에 따른 터널내공변위는 굴착사면 경사가 90°일 때 모든 계측 개소에서 가장 크게 발생을 하고 있으며, 다음으로는 굴착사면 경사가 60°와 75° 순으로 발생하였다.

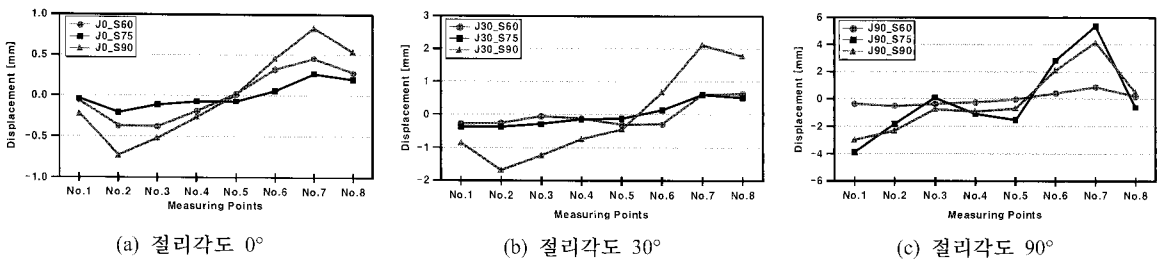


그림 3. 굴착사면 경사에 따른 계측위치별 터널내공변위

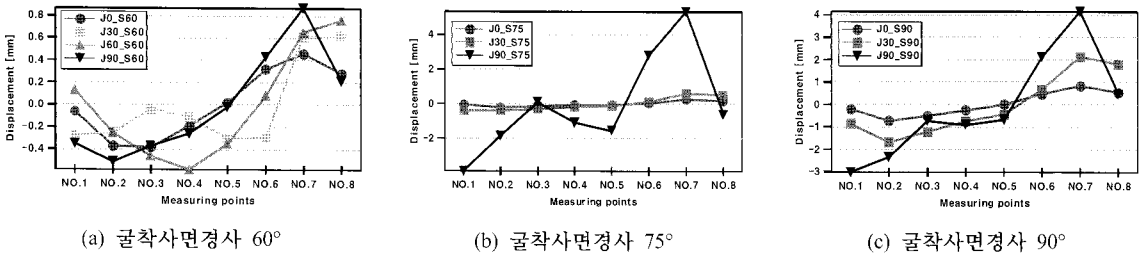


그림 4. 절리각도에 따른 계측위치별 터널내공변위

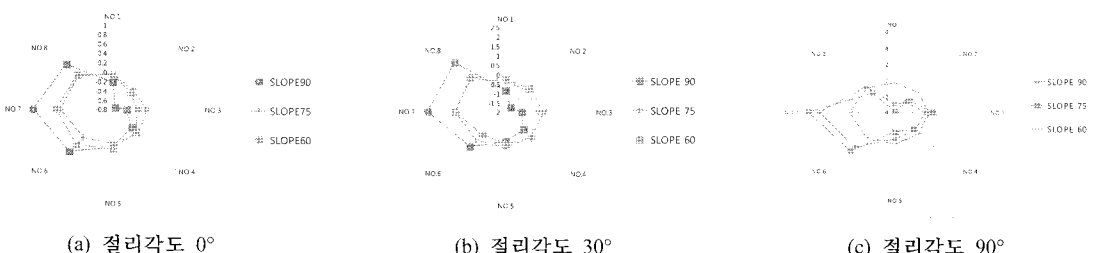


그림 5. 사면 경사에 따른 터널변위 형상

절리각도가 30°일 때의 사면굴착시 터널내공변위는 절리각도 0°일 때의 내공변위 특성과 유사한 경향을 나타내고 있다. 절리각도 0°일 때와 다른 점은 그림 3에서 보는 바와 같이 터널 천정부(No.1)와 터널 바닥부(No.5)에서의 변위가 사면각도에 상관없이 터널내부로 축소하는 경향을 보이고 있다는 점이다. 또한 절리각도 0°일 때의 터널 내공변위 값과 비교하여 전반적으로 큰 변위가 발생하였으며, 굴착사면 경사가 커질수록 터널내공 확대변위와 축소변위의 값이 커지는 특징을 보여주고 있다.

절리각도가 90°일 때의 사면굴착시의 터널의 내공변위에 의한 터널형상은 절리각도 0°일 때와 30°일 때의 내공변위 특성과 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있으나 큰 차이점은 최대 축소 내공변위 발생 위치가 다르다는 점이다. 절리각도가 0°와 30°일 경우에는 우측 어깨부(No.2)에서 최대 축소변위가 발생하였으나 절리각도가 90°인 경우에는 굴착사면 경사가 75°와 90°인 경우에 터널 천정부(No.1)에서 발생하였다. 굴착사면경사가 75°와 90°일 때의 내공변위 값들이 굴착사면 경사 60°일 때보다 더 크게 발생을 하고 있으며, 굴착사면각도 75°와 90°일 때의 변위 값들은 비슷한 수치를 나타내고 있다. 또한 다른 절리각도에 비해 천정부와 바닥부에서의 축소변위 값이 크게 발생을 하였으며 이는 사면굴착에 의한 구속압 해방으로 인해 터널상부에 위치하고 있는 절리암반이 터널 천정부에 하중으로 작용하여 발생되는 현상으로 판단된다.

그림 4는 절리각도에 따른 계측위치별 터널내공변위를 나타내고 있다. 모든 굴착사면 경사에서 좌측벽부(No.7)에서의 내공변위는 동일한 굴착사면 경사에서는 절리각도가 클수록 크게 발생하였다. 굴착사면경사가 60°인 경우의 절리각도에 따른 내공변위 발생량은 그림 4 a)에서 알 수 있듯이 차이가 크게 나타나지 않는다.

굴착사면 경사가 75°인 경우에는 절리각도가 90°일 때의 변위량이 나머지 절리각도에 비해 상당히 많이 발생하였으며, 절리각도가 0°와 30°일 때의 내공변위량은 거의 비슷하게 발생하였다. 굴착사면 경사가 90°인 경우의 내공변위량은 굴착사면 경사가 클수록 크게 발생하였다.

3.2 터널라이닝 모멘트

절리각도가 0°일 때의 터널라이닝 모멘트는 그림 6에서 보는바와 같이 사면굴착이 이루어지는 터널 좌측벽부(No.13)부터 좌측 어깨부(No.15)까지 (+)모멘트가 발생하고 터널 천정부(No.1)에서부터 우측 어깨부(No.3)까지 (-)모멘트가 발생하고 있다. 또한 터널 우측벽부 상단인 No.4부터 우측벽부 하단과 바닥부 사이의 측점 No.8까지 (+)모멘트, 바닥부인 No.9부터 좌측벽부 하단 No.12까지 (-)모멘트가 작용하고 있다.

터널 라이닝에 발생하는 (+)최대모멘트 값은 굴착사면 경사에 따라 0.01 kN·m~0.04 kN·m의 차이를 보이고 있으나 굴착사면 경사에 상관없이 절리면과 직교하는 터널의 좌우측 측벽부 주변에서 발생하였다. (-)최대모멘트는 굴착사면 경사에 상관없이 전반적으로 터널 우측 어깨부 부근과 좌측 하단부근에서 발생한다.

그림에서 알 수 있듯이 절리각도가 0°일 경우에는 굴착사면경사가 커질수록 (+)최대모멘트와 (-)최대모멘트가 커짐을 알 수 있다.

절리각도가 30°일 때의 터널라이닝 모멘트는 절리각도가 0°일 때의 (+)모멘트와 (-)모멘트 발생위치가 거의 동일하다. 절리각도 0°일 때와 다른 점은 터널 좌측방향에서 발생하는 최대 모멘트의 위치가 절리각도 0°일 때는 좌측벽부(No.13)에서 발생하였지만 절리각도 30°일 때는 좌측벽부 상단인 No.14에서 발생하고 있다는 점이다. 또한 터널 천정부(No.1)와 터널 천정부 좌측부

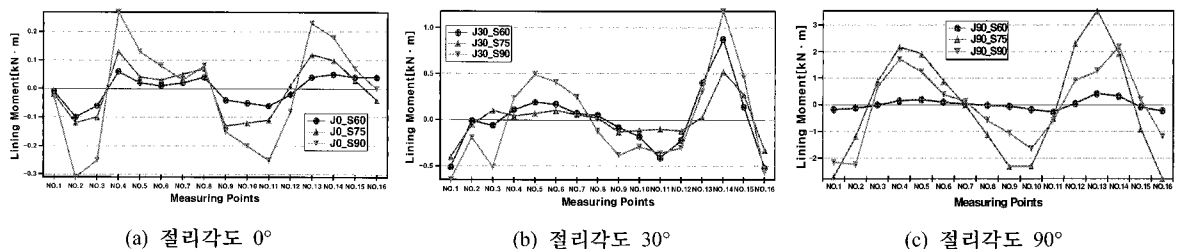


그림 6. 굴착사면 경사에 따른 터널라이닝 모멘트

(No.16)에서 큰 값의 (-)모멘트가 발생하였으며, 터널 우측부에서의 최대 (+)모멘트가 우측벽부(No.5)에서 발생한다는 점이다.

사면경사와 터널 라이닝 모멘트와의 상관관계는 굴착사면 경사가 90°일 때 가장 큰 값들이 발생하고 있으며 60°와 75°일 경우는 계속 위치마다 크기가 조금씩 다르지만 전반적으로 60°일 때가 75°일 때보다 다소 큰 값이 발생하였다.

절리각도가 90°일 때의 터널라이닝의 (+)모멘트와 (-)모멘트 발생위치는 절리각도 30°일 때와는 유사한 경향을 보이고 있으나 (+), (-)모멘트 발생위치가 전체적으로 반시계방향으로 이동한 형태를 보이고 있다. 절리각도 30°일 때의 (+)모멘트의 발생위치는 사면굴착이 이루어지는 터널 좌측벽부(No.13)부터 좌측 어깨부(No.15)까지와 터널 우측벽부 상단인 No.4부터 우측벽부 하단과 바닥부 사이의 축점 No.8까지이며, (-)모멘트의 발생위치는 터널 천정부 좌측편의 No.16에서부터 우측 어깨부(No.3)까지와 바닥부(No.9)부터 좌측벽부 하단(No.12)까지이다. 반면 절리각도가 90°일 때의 (+)모멘트 발생위치는 좌측벽부를 중심으로 아래, 위 개소인 No.12~No.14와 터널 우측 어깨부(No.3)에서 우측벽 하단부(No.7)까지이며, (-)모멘트 발생 위치는 좌측 어깨부(No.15)에서 천정부 우측(No.2)까지와 바닥부 우측

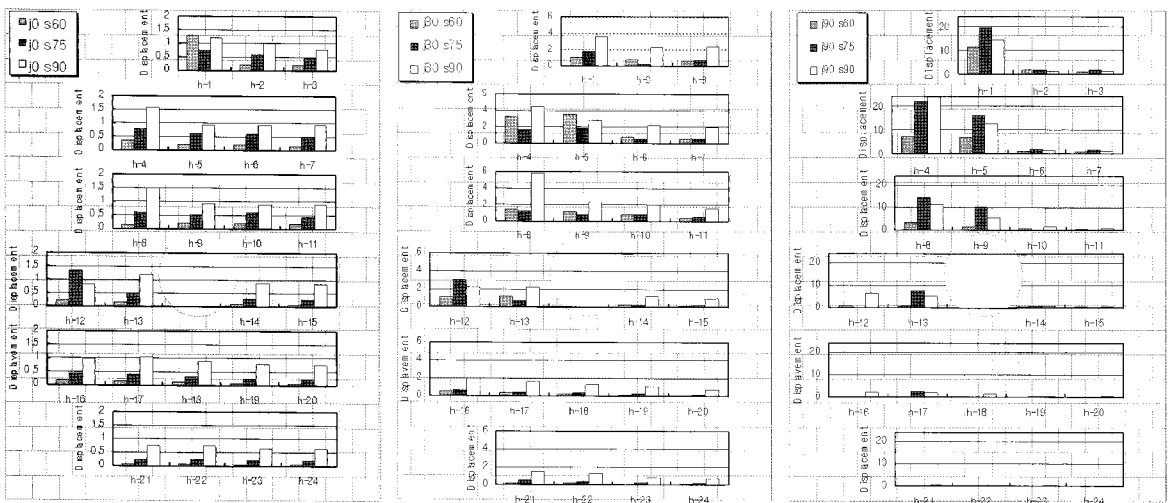
(No.8)에서 좌측벽부 하단(No.11)까지이다.

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. 사면굴착에 따른 축방응력이 구속상태에서 해방됨에 따라 좌측벽부(No.13)와 좌측어깨(No.14) 방향으로 모멘트가 증가하는 특성을 보이고 있다.

4.3 지중변위

절리암반을 모사한 블록에 24개의 LVDT를 설치하여 사면굴착시 기존터널 거동에 영향을 미치는 절리면의 지중변위를 계측하였다.

절리각도별 수평지중변위는 그림 7에 나타내었다. 절리각도가 0°일 때의 수평 지중변위의 값은 그림에서 보는바와 같이 H1과 H12를 제외한 모든 계측개소에서 굴착사면의 경사가 클수록 그 값이 크게 나타나는 특징이 있다. 각 층별 최대 수평지중변위는 전반적으로 같은 층의 계측개소에서는 굴착사면과의 거리가 가까울수록 수평지중변위가 크게 발생하였다. 굴착사면 각도 60°일 때 세 번째 층과 굴착사면 각도 90°일 때의 네 번째와 다섯 번째 층에서 일부 다른 특징이 보이고 있으나 그 차이가 매우 작은 값을 보이고 있다.



(a) 절리각도 0°

(b) 절리각도 30°

(c) 절리각도 90°

그림 7. 굴착사면 경사에 따른 계측위치별 절리암반 수평 지중변위

절리각도가 30°일 때의 수평 지중변위의 값은 전반적으로 터널이 위치하고 있는 층을 포함한 터널 상부층의 사면에 근접한 개소(H1, H4, H8, H12)와 터널 직상부에 위치한 개소(H5, H9), 그리고 터널 좌측면에 인접해 있는 H13에서 많이 발생하고 있다. 터널보다 아래에 위치한 다섯 번째 층(H16~H20)과 여섯 번째 층(H21~H24), 그리고 터널이 위치한 층의 터널 우측면(H14, H15)에서의 수평지중변위가 상대적으로 작게 발생하고 있다. 절리각도 30°일 때의 수평 지중변위는 같은 층의 계측개소에서는 굴착사면과의 거리가 가까울수록 수평 지중변위가 크게 발생하는 특징이 있으며 층별 특징으로는 최상층이 가장 많은 수평지중변위를 나타내며 아래로 갈수록 그 값이 작아지고 있다. 이러한 특징은 절리각도 0°일 때의 수평지중변위 특징과 같다.

절리각도가 90°일 때의 수평 지중변위의 값은 절리각도 30°일 때의 특징과 같이 터널을 중심으로 터널의 직상부와 터널의 좌측부에서의 수평 지중변위값이 크게 발생하였다. 터널이 위치한 층의 아래층과 터널 직상부를 중심으로 우측면에서는 수평지중변위가 상대적으로 작게 발생하고 있으며 같은 절리층에서는 굴착사면에 가까울수록, 굴착사면과의 거리가 같은 위치에서는 위에 있는 절리층일수록 수평지중변위의 값은 크게 발생하였다. 절리각도가 90°일 때의 수평지중변위는 다른 절리각도에 비해 매우 많이 발생하였다.

절리각도가 90°일 때의 수평 지중변위의 값은 대부분의 계측개소에서 굴착사면의 경사가 75°일 때가 90°경사일 때보다 큰 값을 나타내고 있다. 또한 터널을 포함한 터널 좌측면의 수평지중변위에 비해 우측면 변위는 상대적으로 상당히 작은 값을 나타내고 있다.

전반적으로 수직지중변위는 수평지중변위에 비해 상대적으로 그 값이 작게 나타난다. 예를 들면 수평변위의 최대값은 절리각도 0°인 경우, 1.56 mm, 30°인 경우, 3.55 mm이며 90°인 경우 23.74 mm인데 반해 수직변위의 최대값은 0°인 경우에 0.45 mm이며 30°인 경우 1.58 mm, 90°인 경우 4.48 mm이다.

5. 결 론

절리암반에서 터널에 근접하여 사면굴착시 기존 터널의 거동특성을 파악하기 위하여 실험형 모형시험을 수

행하였다. 실험형 모형시험에서는 블록을 이용하여 절리암반과 절리면을 모사하고, 구속상태의 블록을 차례로 제거하는 방법으로 사면굴착을 모사하여 절리암반상의 터널 거동특성을 파악하였다. 시험을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 동일한 절리각도에서는 절리각도에 따라 조금씩의 차이는 있지만 굴착사면 경사가 급할수록 터널의 내공변위가 많이 발생하며 동일한 굴착사면경사에서는 절리각도가 클수록 많이 발생하는 경향이 있으나, 절리각도 90°인 경우에는 굴착사면 경사가 75°일 때가 굴착사면 경사 90°일 때보다 내공변위 값이 더 크게 나타났다. 이는 절리각도와 동일한 각도로 사면굴착시 상부암반이 하중으로 작용하여 절리암반의 수평 변위를 억제함으로써 터널의 거동을 구속하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 특징은 터널 라이닝 모멘트 특성에서도 나타나고 있다.
2. 절리암반상의 기존터널에 근접하여 사면굴착시, 굴착사면경사와 절리각도에 상관없이 사면굴착방향인 좌측벽부(No.7)에서 터널 내공변위가 최대로 발생하였다.
3. 절리각도가 90°인 경우, 구속되어 있던 절리암반이 사면굴착으로 인하여 해방됨으로서 터널 천정부 상부에 있던 절리암반이 하중으로 작용하여 터널 천정부에서는 터널변위가 터널 내측방향으로 크게 발생하였으며, 터널 바닥부(No.5)에서도 터널 내측방향으로 내공변위 축소가 발생하였다.
4. 터널 라이닝 모멘트는 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.
5. 절리각도가 0°인 경우, 굴착사면 각도가 클수록, 굴착사면에서 가까울수록, 지표면에 가까울수록 지중 수평변위 발생량이 많아지는 경향이 있다. 반면 절리각도가 30°인 경우는 절리면의 영향으로 굴착사면 경사에 따라 계측위치별 특성이 다르게 발생하고 있으며, 절리각도가 90°인 경우에는 상부에 있는 암반이 하중으로 작용하여 절리각도 75°인 경우보다 수평 지중변위가 작게 발생하였다.
6. 절리각도가 30°와 90°인 경우에는 터널 천정부를 기

준으로 좌측편, 그리고 터널이 위치하고 있는 절리면을 기준으로 상부에서의 수평지중변위가 크게 발생하는 경향이 있다.

7. 사면굴착시 절리각도와 굴착사면 경사가 클수록 지중변위 발생량이 대부분 증가하고 있으며 이로 인해 터널 내공변위 발생량과 터널라이닝 모멘트 발생량이 증가하였다. 이러한 현상은 절리각도가 급할수록 구속압 해방에 의한 절리암반의 전단변형 발생량이 증가하며, 굴착사면경사가 급할수록 절리면에 작용하는 절리방향의 전단응력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
8. 상기의 경향을 볼 때 절리암반상의 기존터널에 근접하여 사면굴착시 기존 터널에 대하여 절리각도와 굴착경사에 따라 터널 좌측벽부, 좌우측 어깨부, 천정부에 대한 안정성 검토 및 모니터링 시스템이 필요하며, 굴착사면에 대한 보강은 터널 좌측 어깨부를 중심으로 검토하여야 할 것으로 판단된다.

이상과 같은 특성을 바탕으로 향후 사면 굴착단계에 따른 터널거동 분석, 터널부재력과 지중변위의 상관관계 분석, 굴착에 의한 하중전이 특성 분석 등을 수행하고 수치해석 결과와의 비교를 통하여 절리암반상에서의 사면굴착시 기존터널의 안정성 향상 방안 및 굴착면 보강 방안에 대한 신뢰성 있는 연구결과를 도출할 계획이다.

참고문헌

1. 박승준, 김동갑, 이상덕 (2004), “절리지반에서 2단계로 굴착되는 터널의 거동특성에 대한 실험적 연구”, 터널 기술, 제6권, 제4호, pp. 303-313.
2. 변광욱, 안정환, 김동갑, 이상덕 (2005), “2단계로 굴착되는 터널의 절리에 대한 연구”, 터널과 지하공간, 제15권, 제3호, pp. 185-194.
3. 정형래, 김종우 (2006), “이방성 암반의 방향성과 축압 조건을 고려한 터널 모형실험 연구”, 터널과 지하공간, 제16권, 제4호, pp. 313-325.
4. Jian-Hong Wu, Y. Ohnishi, S. Nishiyama (2004), “Simulation of the mechanical behavior of inclined jointed rock masses during tunnel construction using Discontinuous Deformation Analysis (DDA)”, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 41, pp. 731-743.
5. Duddeck, H. and Erdmann, J. (1985), “On structural design models for tunnels in soft soil. Underground Space”, Vol. 9, Pergamon Press, pp. 246-259.
6. Soliman, E., Duddeck, H. and Ahrens, H. (1993), “Two and Three dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 13-18.
7. Hobbs, D. W. (1966), “Scale model study of strata movement around mine road ways”, Apparatus, technique and some preliminary results, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 3.