

# 절리암반에서 근접 사면굴착에 의한 하중전이특성에 대한 실험적 연구

## Experimental Study on Load Transfer Characteristic by Adjacent Slope Excavation in a Jointed Rock Mass

이진욱<sup>†</sup> · 이상덕\*

Jin-Wook Lee · Sang-Duk Lee

**Abstract** An optimal reinforcement in the joint rock slope excavation adjacent to an existing tunnel would be influenced by excavation distance from the tunnel, slope angle, and joint conditions but has been empirically determined so far. In this study, large scale model tests were conducted to find out the relationship between load translation on the excavation surface and behavior of the tunnel according to excavation steps of the jointed rock slope. Consequently, two main parameters, joint dip and slope angle were investigated in those model tests. From the test results, it was found that tunnel deformation was the largest one when the excavation of joints located closer to the tunnel crown or invert. Stability of the slope and the tunnel were varied in a certain excavation stage related to the angle of slope. In the future, based on results of this study the reinforcement method for the tunnel and slope safety in a jointed rock mass will be demonstrated.

**Keywords** : Joint rock mass, Slope excavation, Behavior of tunnel, Horizontal pressure, Load transfer

요 지 기존 터널에 근접하여 절리암반 굴착시 사면의 적절한 보강방법 및 시기는 굴착사면과 터널과의 근접도, 굴착사면 경사는 물론 절리상황에 의해 영향을 받지만 현재까지는 경험적으로 결정되고 있다. 본 연구에서는 터널에 근접하여 절리암반 지반을 굴착시 굴착단계에 따른 굴착사면에서의 하중전이 특성과 터널거동과의 상관관계를 분석하기 위하여 절리각도와 굴착사면 경사를 영향인자로 한 대형 모형시험을 실시하였다. 시험결과, 터널변형은 터널 천정부 또는 바닥부에 근접한 절리면 굴착시 가장 크게 발생을 하였으며, 사면과 터널의 안정성은 굴착사면의 경사와 관련하여 굴착단계에 따라 변화하였다. 향후 본 연구결과를 활용하여 절리암반에서의 터널과 사면의 보강방안을 도출하고자 한다.

주 요 어 : 절리암반, 사면굴착, 터널거동, 수평토압, 하중전이

### 1. 서 론

철도터널에 근접하여 도로 또는 다른 구조물을 건설하기 위해 사면을 굴착할 때, 사면의 안전성뿐만 아니라 터널의 안정성도 같이 검토해야 한다. 이는 사면굴착이 기존 터널 주위 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 절

리상태, 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.

Shen(1997)은 절리암반상의 터널주변 절리간격과, 크기, 형상 등이 터널과 주변지반 거동에 미치는 영향을 UDEC을 이용하여 분석하였으며, Jia(2008) 등은 절리각과 수평압력계수가 절리암반상의 터널에 미치는 영향을 수치해석으로 분석하였다. 박승준(2004)은 절리지반에서 굴착되는 터널의 거동특성을 실험실 시험을 통하여 분석하였다.

본 논문에서는 절리암반상의 기존터널에 근접하여 사면을 굴착할 때 사면굴착면에 작용하는 수평지중하중의 전이

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원  
E-mail : jinugi@krti.re.kr

TEL : (031)460-5307 FAX : (031)460-5319

\* 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

특성과 터널거동과의 상관관계를 파악하기 위하여 실험실 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 모형시험 장치

### 2.1 개요

절리암반상에 있는 터널에 근접하여 사면을 굴착할 경우 절리각도와 굴착사면경사에 따른 기존터널의 거동을 분석하기 위하여 실험실 실험을 수행하였다. 실험실 모형시험은 크기가 3.1m\*3.1m\*0.50m(폭\*높이\*길이)이며 평면변형 상태를 유지할 수 있도록 제작하였다. 실제 절리암반과 유사한 모형지반을 모사하기 위해 일정크기의 블록을 제작, 조적하여 지반을 조성하였다. 터널은 1/10축척(직경 0.6m)으로 평면 변형률 조건을 만족시키는 조건에서 강재라이닝을 설치하여 모사하였다. 터널의 크기는 모형실험장치와 블록의 크기 및 상사율 뿐만 아니라 터널 라이닝 제작의 편의성도 고려하여 결정하였다. 터널은 굴착면에서 터널의 경계면까지의 거리가 터널의 직경 D만큼 떨어져 위치시키고, 절리각도는 수평에서 수직까지 변화가 가능하지만 0°에서부터 90°까지 30°씩 다르게 하였다. 또한 4가지 절리경사에 대해 사면굴착 경사를 60°, 75°, 90° 3가지로 변경하여, 사면을 굴착하면서 기존터널의 거동을 측정하여 분석하였다.

### 2.2 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. 실내시험 결과 블록의 마찰각은 31°이였으며, 모델지반은 RMR=65인 양호한 상태에 해당된다.

모형지반의 측면과 바닥 경계는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 마찰을 최소화하기 위하여 실험장치의 좌우면과 하면에 그리스를 바른 롤러와 간격재를 설치한 후 그 위에 철판을 설치하였다.



Fig. 1. Boundary condition

### 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 ;

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

여기서 첨자 m = 모형터널

$E_k(E_{km})$  = 실제(모형)지반의 탄성계수(kPa)

$R(R_m)$  = 실제(모형) 터널반경(m)

$E_b(E_{bm})$  = 실제(모형)라이닝 탄성계수(kPa)

$I_b(I_{bm})$  = 실제(모형)라이닝 단위길이당 단면2차모멘트 ( $t_m^3/12$ )

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

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

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

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

실제 지반의 탄성계수( $E_k$ )는 5,000MPa이고 모형 지반의 탄성계수( $E_{km}$ )는 400MPa이다. 직경 0.6m인 모형터널 라이닝은 두께 6mm인 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, 가속도 기준의 상사법칙을 적용하였다. 상사율을 고려하여 별도의 하중재하를 하지 않고 블록의 자중만을 사용하여 시험을 수행하였다. 본 연구에서 터널라이닝은 축소율이 1/10이고 철판의

단위중량 78kN/m<sup>3</sup>을 적용하여 축소율을 산정한 결과는 Table 1과 같다.

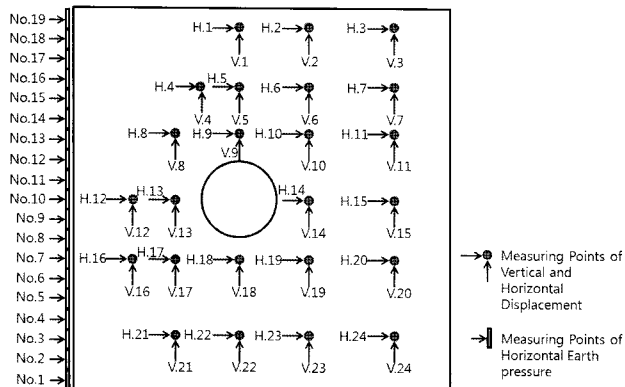
Table 1. Reduction Rate of Model Test

| Property | Dimensions                          | Reduction Rate |
|----------|-------------------------------------|----------------|
| 길이       | [L]                                 | 1/10           |
| 시간       | [T]                                 | 1/3.16         |
| 질량       | [M]                                 | 1/3,120        |
| 밀도       | [ML <sup>-3</sup> ]                 | 1/3.12         |
| 응력       | [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ] | 1/31.24        |
| 중력가속도    | [LT <sup>-2</sup> ]                 | 1.0            |

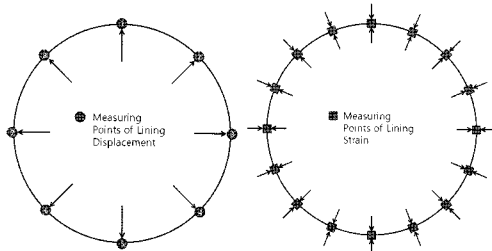
## 2.4 계측항목 및 위치

터널의 내공변위(8개소), 라이닝의 부재력(32개소), 지중 변위(24개소), 수평토압(19개소)을 모형시험에서 지반을 굴착하면서 계측하였다. 계측항목과 위치도는 Fig. 2와 같다.

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



a) Underground displacement, Horizontal earth pressure



b) Tunnel distortion and Lining strain  
 Fig. 2. Measuring points for model tests

## 2.5 시험방법

절리암반에 위치한 터널에 근접하여 사면굴착시 터널의 거동특성을 분석하기 위하여 모형터널의 크기와 두께는 위

에서 설명한 상사율을 계산하여 결정하였다. 모형지반의 절리각도는 0°, 30°, 60°, 90° 4가지로 구축하였으며, 각 절리각도에 대해 굴착사면경사가 90°, 75°, 60°가 되도록 굴착하였다. Table 2에서와 같이 총 12case의 시험을 수행하였으나 J60S75 case와 J60S90 case는 절리각도가 블록의 마찰각 보다 크고 사면의 각도가 커 시험이 불가능 하였다. 시험에서 굴착단계에 따른 터널의 내공변위와 모멘트 변화량, 수평토압의 변화를 측정하여 분석하였다. 절리암반 사면의 굴착시 굴착단계에 따른 터널내공변위와 하중전이특성을 파악하기 위하여 실험용 모형실형 장치의 좌측면에 잭(Jack)을 설치하여 절리암반 모델을 구축하고 지반의 안정화 단계를 거친후 설치한 잭을 차례로 제거하면서 굴착사면경사에 맞추어 블록을 제거하였다. 상단에서부터 2단씩 블록을 제거하고 블록 제거시마다 안정화를 위하여 일정시간 대기후 계측하였다.

Table 2. Test case

|           | 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    |

## 3. 시험결과 분석

절리암반에 위치한 터널에 근접하여 사면굴착시 하중전이 특성과 터널거동과의 상관관계를 분석하기 위하여 사면 근접굴착에 따른 터널의 내공변위와 모멘트 변화량 및 수평토압을 측정하여 분석하였다.

### 3.1 절리각도 0°일 때의 상관관계 분석

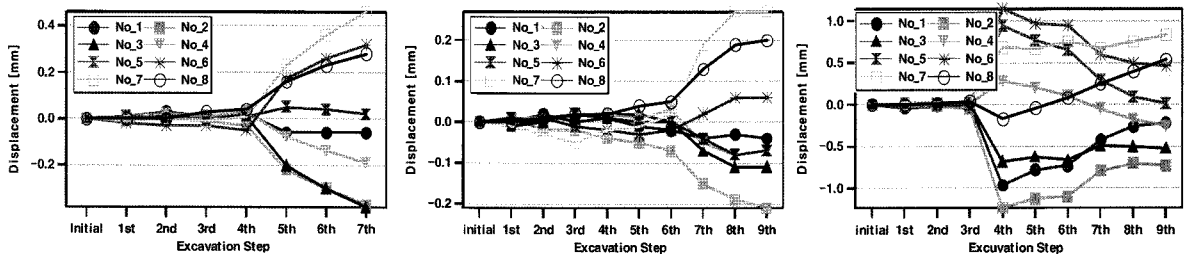
절리각도 0°인 경우에 내공변위는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 굴착사면경사가 60°인 경우에는 터널이 통과하는 절리면 굴착시(5단계 굴착) 급격한 증가가 나타났다. 굴착사면경사가 75°인 경우에는 터널 바닥 하부를 통과하는 절리면 굴착시(7단계 굴착), 굴착사면경사가 90°인 경우에는 터널의 천단부를 통과하는 절리면 굴착단계인 4단계 굴착시 터널의 내공변위가 급격히 증가하였다. 가장 많이 변위가 발생한 터널 좌측벽부(No.7)에서의 터널내공변위를 보면 굴착사면경사가 60°인 경우 5단계 굴착시 0.23mm가 발생하였으며 이것은 4단계 굴착시 0.01mm 대비 47.8% 증가한 것이다. 굴착사면경사가 75°인 경우에는 7단계 굴착시 0.19mm가 발생하였으며 이것은 전단계 굴착 대비 63%로 가장 급격히 증가한 값이다. 또한 굴착사면경사가 90°인 경우에는 4단계 굴착시 0.68mm가 발생하였으며 3단계 굴착시 변위량 0.03mm 대비

78.3%에 해당하는 증가량을 보이고 있다.

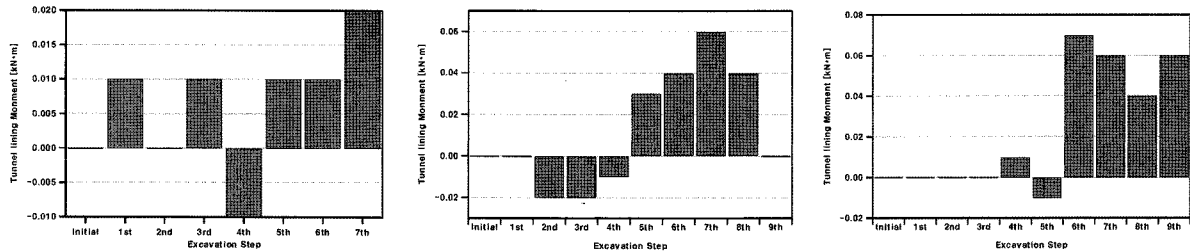
굴착사면경사가 60°일 때 최대 모멘트가 발생하는 좌측 벽부 상단(No.14)에서의 모멘트 최대 변화량은 6단계 굴착시 0.03kN·m에서 7단계 굴착시 0.05kN·m로 40% 증가하였다. 굴착사면경사가 75°와 90°일 때 최대모멘트가 발생하는 좌측벽부(No.13)에서의 모멘트 최대 변화량은 각각 6단계 굴착시 33.3%, 30.4%로 증가하였다. 모멘트의 변화율은 터널 내공변위의 변화량과 일치하지는 않지만 4단계 굴착과 7단계 굴착 사이에서 최대 모멘트 변화량이 발생하고 있다.

수평 지중응력이 가장 크게 증가하는 개소는 수평 로드 셀 No.9에서 No.12까지이다. 이것은 터널을 통과하는 절리면에 해당한다. 굴착에 의한 하중전이로 No.9에서 No.12까

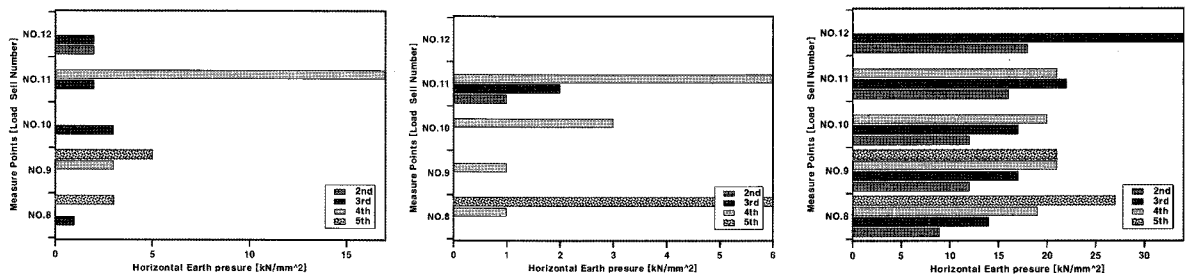
지의 수평토압이 최대값이 된 이후에 계속되는 굴착으로 인해 수평 지중응력이 해방되므로써 기존 터널거동에 큰 영향을 미치게 된다. 절리각도가 0°이면서 굴착사면경사가 60°인 경우, 4단계 굴착시 No. 11에서 17kN로 최대하중이 작용한 후 5단계 굴착에서 구속되어 있던 지중응력이 해방된다. 5단계 굴착은 그림에서와 같이 터널을 통과하는 절리면 굴착에 해당된다. 굴착사면경사가 75°인 경우는 4단계 굴착시 No. 11에서 6kN의 하중이 최대 하중으로 작용하게 되며 굴착사면경사가 90°인 경우, No.9에서 No.12까지 전체적으로 3, 4, 5단계 굴착시 굴착단계에 따라 약 20kN의 하중이 작용하고 있으며 No.12에서는 3단계 굴착시 최대 34kN의 하중이 작용한다.



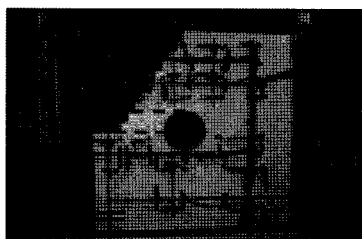
(a) Tunnel deformation



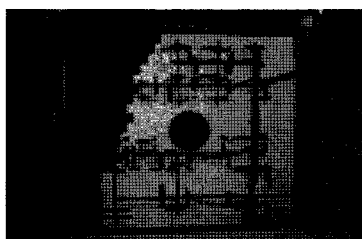
(b) Moment of tunnel lining



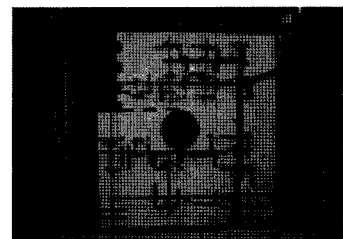
(c) Horizontal underground pressure depending on excavation



(a) 5<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 60°)



(b) 7<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 75°)



(c) 4<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 90°)

(d) Excavation step

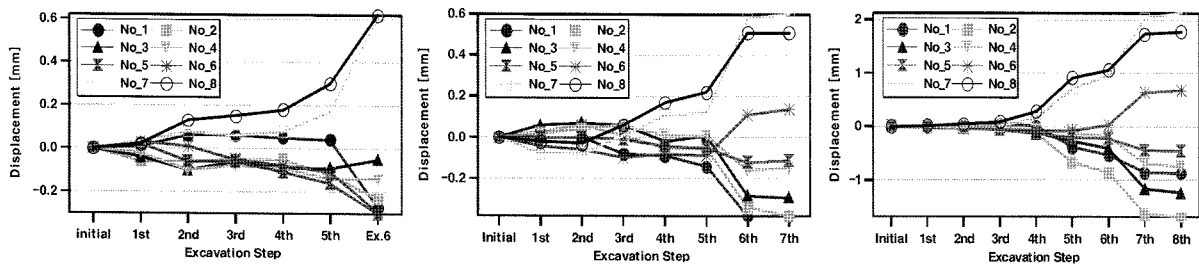
Fig. 3. Tunnel deformation, moment and lateral underground stress depending on slope angle (Joint dip 0°)

### 3.2 절리각도 30°일 때의 상관관계 분석

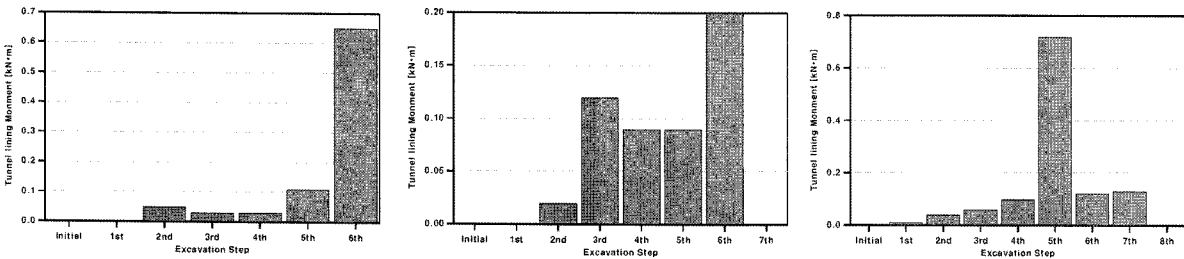
절리각도가 30°인 경우의 내공변위 변화량은 Fig. 4와 같다. 이 경우 굴착사면경사가 60°와 75°인 경우를 터널을 통과하는 6단계 굴착시 내공변위 변화량이 가장 커지며 내공변위량이 가장 큰 좌측벽부(No.7)에서의 값은 0.17mm에서 0.61mm로 72.1%, 0.12mm에서 0.58mm로 76.7%의 증가량을 나타내고 있다. 굴착사면경사가 90°인 경우에는 두 번에 걸쳐 최대변화량이 나타난다. 예를 들어 좌측벽부(No.7)에서 터널의 천단부를 통과하는 절리면을 굴착하는 5단계 굴착시 0.16mm에서 0.72mm로 29%로 첫 번째 급격한 증가량이 나타났으며 다음으로 7단계 굴착시 0.95mm에서 2.03mm로 50.7%의 급격한 증가를 보

이고 있다.

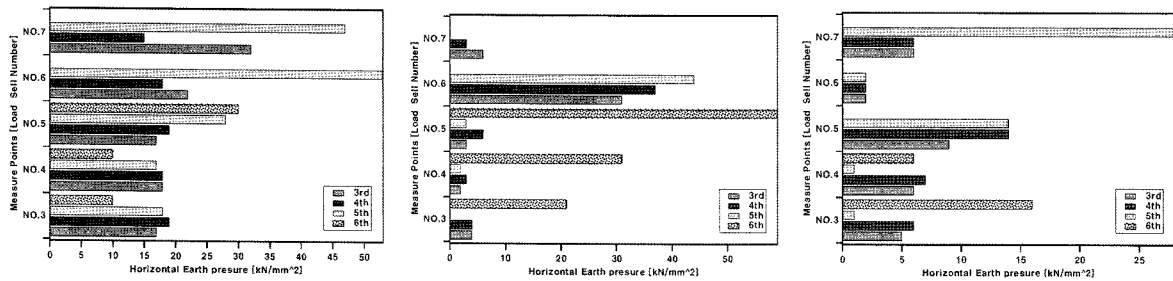
터널라이닝 모멘트는 터널 좌측벽부 상단(No.14)에서 가장 많이 발생하였으며, 절리각도가 60°인 경우에는 터널 내공 최대변화량이 나타난 6단계 굴착완료시 0.22kN·m에서 0.87kN·m로 74.7%의 증가량이 나타났다. 절리각도가 75°인 경우는 3단계 굴착과 6단계 굴착에서 변화량이 크게 나타났다. 최초 큰 변화량은 3단계 굴착시 0.02kN·m에서 0.14kN·m로 23.1%의 큰 변화량이 나타난 후 6단계 굴착시 0.32kN·m에서 0.52kN·m로 38.5%의 가장 큰 변화량이 나타났다. 90°인 경우에는 터널의 천단부를 통과하는 절리면인 5단계 굴착시 0.21kN·m에서 0.93kN·m로 61%의 최대 증가량이 나타났다.



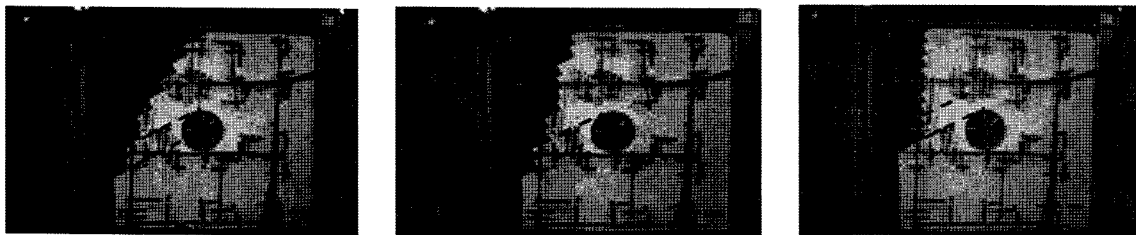
(a) Tunnel deformation



(b) Moment of tunnel lining



(c) Horizontal underground pressure depending on excavation



(a) 6<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 60°)      (b) 6<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 75°)      (c) 5<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 90°)

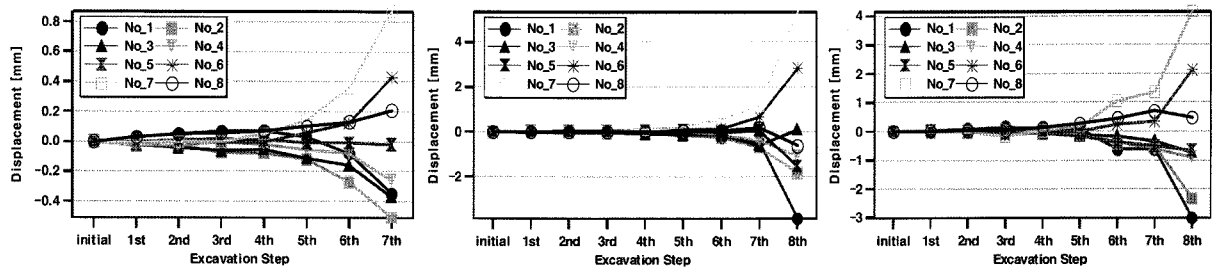
(d) Excavation step

Fig. 4. Tunnel deformation, moment and lateral underground stress depending on slope angle (Joint dip 30°)

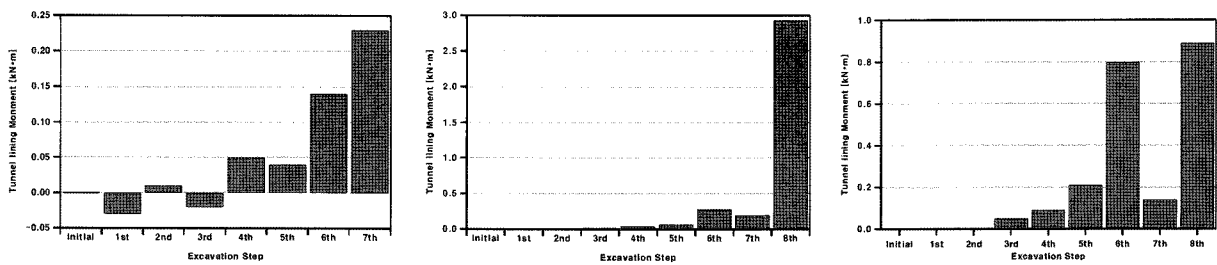
절리각도가 30°인 경우 굴착에 따른 수평토압이 가장 큰 개소는 수평토압계는 터널을 통과하는 절리면인 No.4에서 No.7까지이다. 절리각도가 30°이면서 굴착사면경사가 60°인 경우, 5단계 굴착시 해당 로드셀에 53kN의 최대하중이 작용한 후 6단계 굴착에서 응력이 해방되어 터널거동에 큰 변화를 나타내고 있다. 굴착사면경사 75°인 경우는 3단계 굴착시 최대 31kN하중이 점차 증가하여 6단계 굴착시 59kN까지 계속하여 증가한다. 절리각도 90°인 경우는 5단계 굴착시 28kN까지 급격하게 증가하고 있다.

### 3.3 절리각도 90°일 때의 상관관계분석

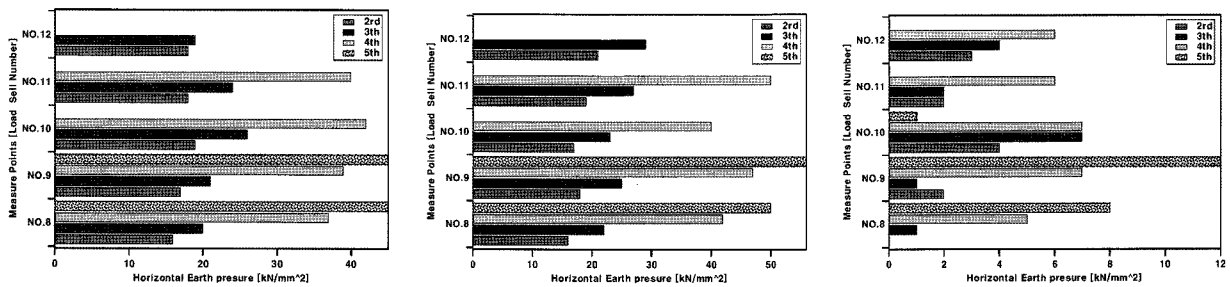
절리각도 90°인 경우의 내공변위는 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 터널 좌측벽부(No.7)에서는 굴착사면경사가 60°인 경우 터널의 바닥 위치까지 굴착시(6단계 굴착) 터널의 내공변위가 0.14mm에서 0.36mm로 25.3% 증가하였으며 7단계 굴착시 내공변위가 0.36mm에서 0.87mm로 58.6% 증가하였다. 모멘트 또한 6단계 굴착시 0.05kN·m에서 0.19kN·m으로 33.3% 증가하였으며 7단계 굴착시 0.19kN·m에서 0.42kN·m로 54.8% 증가하였다.



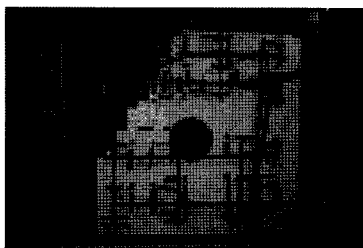
(a) Tunnel deformation



(b) Moment of tunnel lining



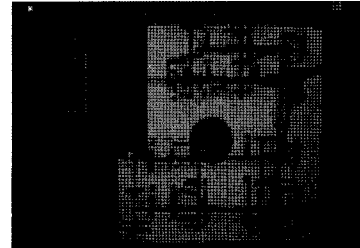
(c) Horizontal underground pressure depending on excavation



(a) 6<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 60°)



(b) 8<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 75°)



(c) 6<sup>th</sup> Excavation step(slope angle 90°)

(d) Excavation step

Fig. 5. Tunnel deformation, moment and lateral underground stress depending on slope angle (Joint dip 90°)

굴착사면경사가 75도인 경우의 내공변위와 모멘트의 최대 변화량은 터널 바닥면에서 터널직경 D 아래까지 굴착할 때에(8단계 굴착) 발생하였다. 내공변위의 경우 1.19mm에서 5.35mm로 77.8%, 라이닝 모멘트의 경우 0.13kN·m에서 2.29kN·m로 94.3% 증가하였다.

굴착사면경사가 90°인 경우는 터널의 바닥 위치인 6단계 굴착시 터널의 내공변위가 0.17mm에서 1.05mm로 21%, 8단계 굴착시 1.35mm에서 4.15mm로 67.5% 증가하였다. 모멘트 또한 동일한 굴착단계인 6단계 굴착에서 0.35kN·m에서 1.15kN·m로 36.7%, 8단계 굴착에서 1.29kN·m에서 2.18kN·m로 40.8%의 큰 변화량을 나타내고 있다.

절리각도 90도인 경우 터널에 영향을 미치는 계측위치는 No.8~No.12이며 60°와 75°인 경우는 4단계, 5단계 굴착에서 최대 수평토압이 각각 37kN~45kN, 40kN~56kN 작용하고 있다. 절리각도가 90°인 경우에도 4단계, 5단계 굴착에서 최대 수평토압이 작용하고 있지만 그 값이 7kN~12kN으로 다른 굴착사면경사에 비해 작은 값을 나타내고 있다. 이는 절리각도와 굴착사면경사가 동일한 경우 나타나는 특징으로서 동일각도로 사면을 굴착시 응력해방에 다른 하중전이가 크게 발생하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

절리암반에서 기존터널에 인접하여 사면굴착시 굴착단계에 따른 기존 터널의 거동과 굴착면에서의 하중전이 특성을 파악하기 위하여 절리면의 각도와 굴착사면의 경사를 파라미터로 한 대형 모형실험을 실시하였으며, 이를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절리각도가 0°이면서 굴착사면 경사를 변화시켜 실험을 수행한 결과, 굴착사면경사를 60°로 하였을 경우에는 터널을 통과하는 절리면 굴착시(5단계 굴착), 75°로 사면을 굴착하였을 경우에는 절리면 바닥부를 지나는 절리면 굴착시(7단계 굴착), 굴착사면 경사를 90°로 하였을 경우에는 터널 천정부를 지나는 절리면 굴착시(4단계 굴착)에 터널의 내공변위 변화량이 급격히 증가하였다.
- 2) 절리각도 0°일 때의 터널 라이닝 모멘트는 굴착사면경사 60°에서는 그 값이 매우 작아 변화량의 비교가 어려우며, 굴착사면경사 75°, 굴착사면경사 90°인 경우에는 각각 7단계와 5단계 굴착시 가장 급격히 증가하였다. 굴착면에 작용하는 수평토압은 모든 굴착사면경사에 대해 터널이 위치하는 절리면 굴착 전단계인 4단계 굴착시 최대 수평토압이 작용하므로 5단계 굴착시 작용

하던 수평토압에 의한 구속압이 해방되므로 절리암반의 지중변위에 의한 터널거동이 영향을 많이 받게 된다.

- 3) 절리각도가 30°이면서 굴착사면경사 60°, 75°인 경우, 터널을 통과하는 절리면을 굴착하는 6단계 굴착시 내공변위변화량이 급격히 증가하였으며 굴착사면경사 90°인 경우에는 터널 천정부를 지나는 절리면을 굴착하는 5단계 굴착시 내공변위 변화량 급격히 증가하였다. 굴착에 의해 발생하는 터널 라이닝 모멘트의 증가량은 굴착경사가 60°와 90°인 경우에는 최대 터널내공 증가량이 발생하는 동일한 굴착단계에서 발생하였으며 75°인 경우에는 3단계 굴착에서 발생하였다.
- 4) 절리각도가 30°일 때에 굴착에 따른 수평토압은 굴착사면경사 60°와 75°일 때는 5단계 굴착에서 가장 큰 토압이 작용한 후 6단계 굴착에서 응력이 해방되어 터널의 거동에 큰 영향을 미치게 되며, 90°일 때는 터널을 통과하는 절리면인 5단계 굴착시 터널에 가장 큰 영향을 미치게 된다.
- 5) 절리각도 90°일 때의 굴착에 따른 내공변위와 모멘트는 굴착사면경사 60°와 90°인 경우, 두 번의 큰 변화가 발생하였다. 첫 번째 변화는 터널 바닥위치인 6단계에서 발생했으며 두 번째 변화는 60°인 경우, 바닥면에서 D/2, 90°인 경우는 바닥면에서 D까지 굴착시 최대 변화가 발생하였다. 굴착사면경사 75°인 경우는 터널위치보다 터널직경 D만큼 아래부분 굴착시 내공변위와 모멘트가 최대로 변화하였다.
- 6) 수평토압은 굴착사면경사 60°와 75°일 때는 4단계, 5단계 굴착시 최대하중이 작용하기 때문에 6단계 굴착시 기존 터널에 가장 많은 영향을 미치게 되며 굴착사면경사 90°인 경우에도 4단계, 5단계 굴착시 최대 수평토압이 작용하지만 그 값은 다른 굴착사면경사 비해 약 20% 수준에 그치고 있다.
- 7) 실험을 통한 터널과 굴착면에서의 하중전이 특성에서 알 수 있듯이 대부분의 터널의 내공변위와 모멘트는 터널이 위치하는 절리면 굴착시 최대로 변화하고 수평토압 또한 같은 특징을 보이고 있어 터널이 위치한 절리면 굴착시 기존터널에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 절리사면 굴착단계에 따른 지중응력 전이특성과 터널거동 특성 분석결과를 통하여 향후 절리면 굴착시 터널의 안정성을 확보하기 위한 사면보강 시기 및 보강 방법에 대한 추가 연구를 수행할 계획이다.

## 참고문헌

1. The German Society for Geotechnics. (2003). Recommendations on Excavations. Ernst & Sohn
2. Goodman, R. E. (1989). "Rock Mechanics(2nd Edition)", John Wiley & Sons
3. Duddeck, H. and Erdmann, J. (1985). "On structural design models for tunnels in soft soil. Underground Space", Vol.9, Pergamon Press, pp.246~259
4. 이상덕(2003). "최신 터널기술의 이해", Ajou University Geotechnical Engineering
5. 박승준, 김동갑, 이상덕(2004), "절리지반에서 2단계로 굴착되는 터널의 거동특성에 대한 실험적 연구". 터널기술 제6권 제4호, pp.303~313
6. B.SHEN (1997). "The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses", Pergamon.
7. P.Jia (2008). "Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass", Tunneling and Underground Space Technology.
8. 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
9. 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.

접수일(2008년 12월 5일), 수정일(2009년 1월 21일),  
게재확정일(2009년 4월 9일)