

균질지반에서 2단계로 굴착되는 터널의 거동특성에 대한 실험적 연구

김동갑^{1)*}, 박승준²⁾, 이상덕³⁾

An Experimental Study on the Behaviour of Tunnel Excavated in a Homogeneous Ground by Two-Stage Excavation

Dong-Gab Kim, Seung-Jun Park and Sang-Duk Lee

Abstract In a shotcrete support system, the cooperation of the ground and the shotcrete lining makes it possible to transfer the shear stress to the shotcrete lining, which is dedicated to form a stable structure. In this study, a homogeneous model ground with constant strength was produced by using gypsum and the tunnel was excavated with a top heading method under the definite initial stress. During the excavation, the stress in the ground around the tunnel and the deformation of shotcrete lining were measured. The tensile stress was generated in tangential direction in the ground near the tunnel and in the shotcrete lining due to tunnel excavation. This shows the unified behavior of the ground and shotcrete lining, which is the most typical characteristic of the shotcrete support. As a result, the rates of in-situ stress during the excavation at a top boundary line was 9% and at top arch heading 15%. It was 48% right after excavating the heading and 94% before cutting the bench.

KeyWords Model test, Tunnel support, Shotcrete, Concrete lining, Gypsum, Stress

초 록 슛크리트 지보 구조는 지반과 슛크리트가 일체화되어 슛크리트 라이닝에 전단력의 전달이 가능한 터널 구조로서 안정한 구조물을 형성하는데 기여한다. 본 연구에서는 석고를 사용하여 일정한 강도를 가진 균질한 모형지반을 제작하였다. 하중재하에 의해 일정한 원지반 응력을 조성한 후 상·하부반단면 굴착공법으로 굴착하며 굴착시 터널 주변지반의 응력상태와 라이닝의 거동특성을 계측하였다. 측정결과 굴착으로 인하여 터널 주변 지반과 라이닝에 접선방향으로 인장응력이 발생되었다. 단계굴착에 의한 응력 해방율은 상부 경계선 확대천공시 9%, 상부반단면 아치부 확대천공시 15%, 상부반단면 경계선 절단 즉시 48%, 안정화 후 하부반단면 굴착전 94%로 나타났다.

핵심어 모형실험, 터널지보, 슛크리트, 콘크리트 라이닝, 석고, 응력

1. 서 론

일반적인 터널의 구조는 슛크리트, 록볼트, 강지보재 등으로 구성되는 1차 지보재와 거푸집을 사용하여 시공되는 2차 콘크리트 라이닝의 복합구조이다. 1차지보인 슛크리트 라이닝과 2차 콘크리트 라이닝은 3차원적으로 2개의 원통형 shell이고, 2차원적으로는 beam과 같은 거동을 하는 2중구조라고 할 수 있다(이상덕 외, 1994).

터널에서 슛크리트는 지반과 일체화되어 거동되어야 하며, 이때 슛크리트와 지반의 부착력의 확보는 중요한 문제이다. 그러나 지반과 슛크리트의 부착에 의한 터널의 거동특성을 확인 하는 시험 방법은 확립되어 있지 않으며, 아직 개념적 방법으로 취급되어진다. 또한, 고품질의 얇은 슛크리트의 유용성을 확인하기 위해서는 시험방법의 개발과 거동특성의 확립이 필요하다.

터널의 지보구조는 슛크리트와 2차 콘크리트 라이닝 사이에 방수공을 겸한 isolation공(2차 라이닝의 구속, crack 방지를 목적으로한 완충재)이 시공되어, 양자간에 전단력이 전달되지 않는 이중구조(Double Shell)가 일반적이다(윤지선 외, 2002. a, b).

따라서 본 연구에서는 지반과 슛크리트가 일체구조로 전단력이 전달되는 터널의 거동특성(N.R. Barton, 1998)을 실험적으로 고찰하고자 하였다. 또한 실험을

¹⁾ 정회원, 아주대학교 건설교통공학과 박사과정

²⁾ 정회원, 삼보기술단 주인

³⁾ 정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

*교신저자(Corresponding Author): dgkim@kumhoeng.co.kr

접수일: 2004년 9월 22일

심사 완료일: 2004년 10월 19일

통해 터널굴착시 응력재분배 현상과 하중전이 등의 거동특성을 규명하고자 하였다.

터널 굴착시 지반과 슛크리트의 거동특성을 파악하기 위하여 모형실험기를 제작하였으며, 실험 모형의 균질성을 확보하기 위해 석고로 지반을 모델링하였다. 석고로 조성된 모형지반에 아치형 슛크리트 모형의 축력과 모멘트를 측정하기 위하여 Steel Lining을 설치하였으며 석고 모형시편에 측압을 $K_0 = 1, 2, 0.5$ 로 변화시켜 원지반 응력상태를 재현한 후 단계굴착을 시행하여 시공단계에 따른 지반 및 슛크리트의 거동특성을 규명하였다.

2. 모형시험

2.1 시험지반 특성

가. 모형지반의 기본물성

모형지반($1 \times 1 \times 0.05$ m)의 균질성과 동일성을 확보하기 위하여 동일한 혼수율과 항온·항습의 조건에서 양생하였다. 양생일수에 따라 수분함량이 감소하며 적정 재령일수가 되어야 소정의 강도를 발현한다. 양생 중 수분함량이 일정해지는 시점을 기준으로 재령일수를 결정하였으며, 실험 결과 14일로 나타났다(Table 1). 적정재령일수에서 석고 지반의 기본물성은 혼수량 80%, 일축압축강도 6.96 MPa, 수분함량 16.47%, 단위중량 10.0 kN/m³, 탄성계수 3600 MPa, 포아손 비는 0.31이다.

Table 1. Properties of gypsum

재령일수	단위중량 (kN/m ³)	수분함량 (%)	압축강도 (MPa)
11	10.20	16.57	5.74
13	10.00	16.67	6.84
17	9.90	16.47	6.94
20	9.90	16.45	6.96
25	9.90	16.42	6.96

나. 지반과 복공의 전단부착강성

스�크리트 라이닝을 모델링 하기 위하여 석고지반과 슛크리트 사이에 0.25 mm 두께의 응력측정용 steel lining을 설치하였다.

본 연구에서 제작된 모형 지반과 응력측정용 steel lining의 부착강성은 30.4 kPa로서 실험시에 충분한 전단부착강성을 가지도록 하였다. 터널굴착 후 슛크리트를 타설하는 지보 구조를 모델링 하기 위하여 steel lining에서 터널 내측으로 5 mm의 석고지반을 존치시켜 슛크

리트 구조를 유지하였다. 5 mm 두께는 모형터널의 수평방향 내공이 0.2 m인 것을 고려하면 2차선 도로터널 규모에서는 약 0.3 m의 슛크리트 두께에 해당된다.

2.2 시험장치

가. 경계조건

본 실험에서는 경계면에서의 마찰을 줄이기 위해 각면을 7개의 Segment로 나누고 Segment와 석고 사이에 몰러를 설치하였다. 몰러 Segment면과 석고와의 마찰을 줄이기 위해서 그리스로 피복된 셀을 사이에 삽입하였다(Fig. 1(a)).

나. 재하장치

본 실험에 사용된 재하 장치는 1차 재하 단계에서는 294.2 kN 용량의 실린더로 하중을 재하 하고 하중의 편차를 줄이기 위해 각 Segment에서 동일한 하중이 가해지도록 조절하였다(Fig. 1(b)).

하중 재하 프레임의 편심이나 힘을 막기 위하여 고정 지점에 베어링을 설치하여 하중 재하시 편심과 프레임의 힘을 방지하였다(Fig. 1(c)).

시험장치의 좌측과 하부는 롤러조건으로 하여 상부 및 우측에서 하중을 재하 및 조절 할 수 있도록 하였다(Fig. 1(d)).

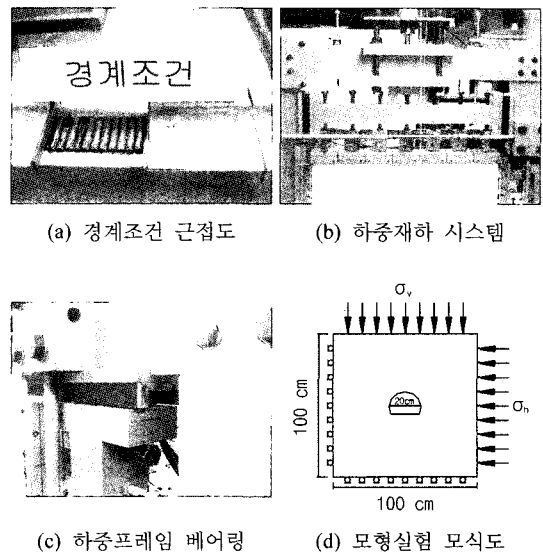


Fig. 1. Equipments

2.3 시험방법

가. 재하조건

본 연구에서는 2차선 도로터널을 기준으로 모델링하

였으며 지반 응력조건은 Table 2에서와 같이 $K_0 = 1, 2, 0.5$ 인 경우에 대해 시험하였다.

Table 2. Load case

측압조건	수직응력 (kN)	수평응력 (kN)
$K_0 = 1$	41.19	41.19
$K_0 = 2$	41.19	82.38
$K_0 = 0.5$	41.19	20.59

나. 실험순서

측압상태에 따른 원지반 응력을 재하한 후 Fig. 2와 같은 과정으로 단계굴착을 실시하여 주변지반의 응력 분포와 슛크리트의 거동특성을 steel lining으로 대체하여 파악하였다. 경계선 천공(직경 3 mm)과 확대천공(직경 7 mm)시 드릴을 사용하여 굴착시 진동에 의한 주변지반의 교란과 계측장치에의 영향을 최소한으로 하였다. 확대천공 후 절단용 톱날을 사용하여 상부반단면 경계선에서 아치부까지 순차적인 절단을 수행하여 굴착에 의한 응력해방을 모델링하였다. 또한 단계굴착시 응력해방에 의해 지반 경계면에서 가압한 응력이 소산되게 된다. 이렇게 응력해방으로 인하여 소산된 지반 경계면에서의 응력을 계속적으로 보정하므로써 지반 경계면에서의 원지반 응력을 유지시켜 현장상태를 보다 유사하게 모델링하였다.

초기 지반의 응력상태를 모사하기 위해서 상부하중과 측방하중을 서서히 가하여 측압에 따른 소정의 응력수준까지 가압해준 상태에서 다음과 같이 실험하였다.

a. 상부반단면 경계선 천공

소정의 응력상태를 유지하고 상, 하 반단면 경계부 상부반단면측에 직경 3 mm로 15개의 경계선 천공을 시행한다. 경계선 천공은 확대천공과 절단시 기준면이 된다(Fig. 2(a)).

b. 상부반단면 아치부 천공

상부반단면 아치부에 직경 3 mm로 17개의 경계선 천공을 시행한다(Fig. 2(b)).

c. 상부반단면 경계선 확대천공

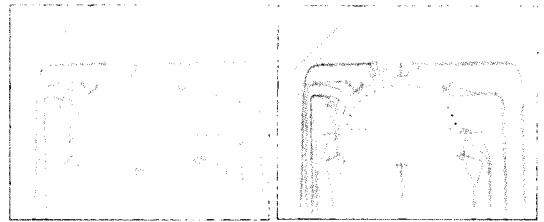
상, 하 반단면 경계부의 경계선 천공을 직경 7 mm로 확대천공 한다. 이것은 경계선 천공을 기준으로 절단이 용이하도록 하기 위하여 시행되었다(Fig. 2(c)).

d. 상부반단면 아치부 확대천공

상부반단면 아치부 천공을 직경 7 mm로 확대천공한다(Fig. 2(d)).

e. 상부반단면 경계선 절단

톱날을 사용하여 확대천공된 지점을 연결하여 절단한



(a) 상부반단면 경계선 천공 (b) 상부반단면 아치부 천공



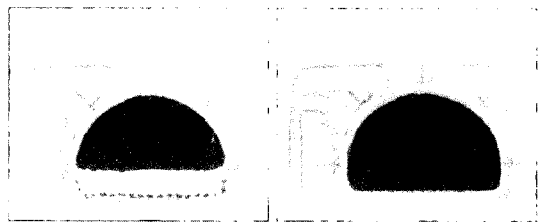
(c) 상부반단면 경계선 확대천공 (d) 상부반단면 아치부 확대천공



(e) 상부반단면 아치부 절단 (f) 30분 안정화



(g) 하부반단면 천공 (h) 하부반단면 확대천공



(i) 하부반단면 경계선 절단 (j) 60분 안정화

Fig. 2. Experimental procedure

다. 지반단면이나 라이닝에 부착되어 있는 Strain Gauge에 영향을 미치지 않도록 절단시킨다(Fig. 2(e)).

f. 30분 안정화

상부반단면의 경계선에 이어서 아치부를 절단하게 되면 굴착이 완료되는데, 이때부터 30분 동안 지반의 안정화 시간을 갖는다(Fig. 2(f)).

g. 하부반단면 천공

하부반단면에 직경 3 mm로 19개의 경계선 천공을 시행한다(Fig. 2(g)).

h. 하부반단면 확대천공

하부반단면 경계선 천공을 직경 7 mm로 확대천공한다(Fig. 2(h)).

i. 하부반단면 경계선 절단

톱날을 사용하여 확대천공된 지점을 연결하여 절단한다(Fig. 2(i)).

j. 60분 안정화

안정화 시간의 산정은 터널 주변지반의 변형이 95% 이상 수렴되는 시점을 측정하여 산정하였다.

a에서 j까지 각 단계별로 석고지반과 Steel Lining에 설치한 strain gauge의 값을 읽어서 굴착 단계별 변화량을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 터널굴착에 따른 지반거동

a. 좌측바닥 지반응력

단계굴착에 따른 터널 좌측 바닥부예의 거동특성은 접선방향응력의 경우 상부반단면 절단시 응력해방에 의한 압축변형이 발생하며, 안정화 후 하부 반단면의 굴착시 인장측으로 전환되었다. 또한 바닥부의 법선방향의 응력은 초기에 응력 해방시 0에 가까운 값을 보였으며 상부반단면 아치부 확대천공시까지의 큰 변화를 나타내지 않지만 아치부 확대천공후 압축변형을 보여주는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3(a)).

b. 좌측부 지반응력

앞에서 나타난 터널 측벽 바닥부보다 응력의 변화가 크게 나타났으며 그 크기는 최대 343.23 kPa ~ 568.79 kPa 범위이다. 측압의 크기가 $K_0 = 0.5$, $K_0 = 1$ 인 경우는 비슷한 경향을 보여주었으나 측방향 하중이 우세한 $K_0 = 2$ 에서는 상이한 결과가 나타났다. 측방향 하중이 우세할 경우 상부반단면 굴착시 접선방향의 변형은 인장측으로 증가하는 경향에서 증가 추이가 급격히 감소되었으며 법선 방향으로의 압축은 계속 진행되었다(Fig. 3(b)).

c. 좌측어깨부 지반응력

일반적으로 알려져 있는 터널의 거동특성상 터널의 어깨부에서 응력이 집중되는 현상이 나타났다. 좌측 어

깨부의 최대 응력변화량은 최대 617.82 kPa의 응력이 법선방향으로 작용하였다. 터널의 단계별 굴착에 따라 터널 어깨부의 접선방향의 응력은 초기지반 응력이 해방되면서 측압이 작은 경우는 다소 압축측으로, 측압이 큰 경우는 인장측으로 변형이 진행되었으며 상부 반단면의 굴착완료 전까지는 49.03 kPa 미만으로 미미하게 진행되다가 상부 반단면이 제거되면서 313.81 kPa 정도까지 급격히 변화하였다(Fig. 3(c)).

d. 천단부 지반응력

천단부에서의 굴착 초기의 응력 양상은 일반적인 터널의 탄성해법에서도 보여지듯이 측압이 우세할 경우에는 천단부에서 접선방향의 응력은 압축응력이 지배적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 법선 방향의 응력은 측압이 클 경우는 압축측으로, 측압이 작은 경우에는 인장측으로 발생하였다(Fig. 3(d)).

e. 바닥부 지반응력

바닥부에서는 복공의 폐합이 이루어지지 않은 관계로 지반변형의 방향이 바닥면이 상승하는 방향으로 발생하였으며 접선방향으로는 측압이 클 경우 압축변형이 크게 일어났다(Fig. 3(e)).

3.2 응력해방율

측압의 상태에 따른 초기지반 응력상태 조성후 단계별 굴착에 따른 굴착 공동 주변 지반의 응력이 재분배되면서 일정한 변형으로 수렴된다. 이러한 굴착에 의한 최종 변형량을 기준으로 굴착단계별 응력해방율을 천 단변형량을 기준으로 산정하였다.

시공단계에 따른 응력해방율을 측정하여 무지보 상태의 평균 응력해방율을 나타내었다. 초기지반 응력상태에서 굴착이 진행되면서 응력이 단계별로 해방된다. 상부반단면 경계선 확대천공시 9%의 응력 해방율이 나타남을 시작으로 상부 반단면의 굴착이 완료된 후 94%의

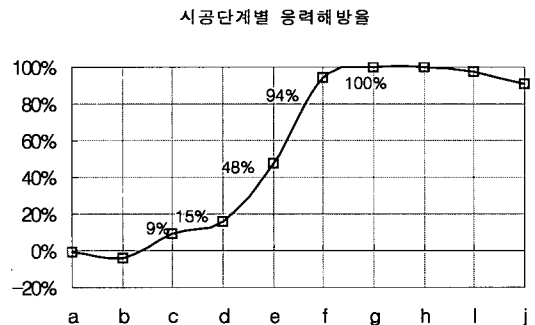


Fig. 4. Stress relief during excavation

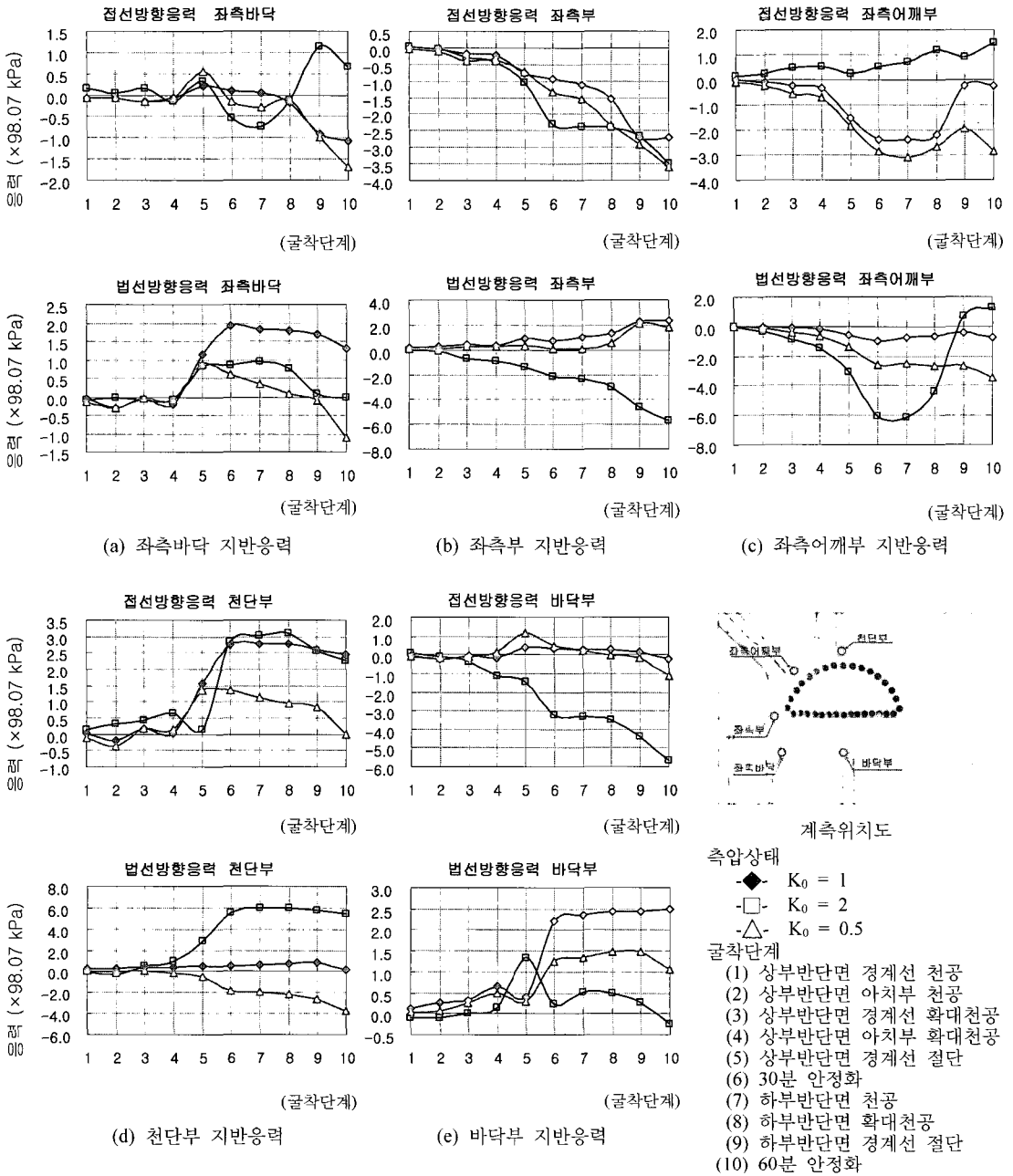


Fig. 3. Ground stress distribution

평균 응력해방율을 보여주었다. 측정점의 위치가 천단면 위를 기준으로 하여 상부반단면 굴착후의 응력 해방율이 94%를 나타내지만 저부측점에서의 평균응력 해방율은 60% 미만인 경우가 많다. 그러나 전체적인 변형량을 평균하여 응력해방율을 산정한 결과 위와 같은 결과가 나왔으며 표준편차가 20% 내외이다(Fig. 4).

3.3 터널굴착에 따른 라이닝 거동

a. $K_0 = 1$

모형지반과 5 mm두께의 슛크리트 모델을 구분하고 슛크리트의 축력과 모멘트를 측정하기 위하여 0.25 mm 두께의 Steel Lining 내·외측에 각각 8개소에 Strain Gauge를 설치하여 슛크리트에 작용하는 응력을 측정하

였다.

굴착이 진행되면서 측벽부에서 지반이 법선방향은 인장, 접선방향은 압축이 발생되었으며 라이닝에는 압축력이 생기고 (-)모멘트가 발생하였다. 이는 측벽부 지반이 내공쪽으로 변형되면서 라이닝에 (-)모멘트가 발생하고 이와 함께 축력도 증가하는 경향을 보였다. 터널의 천단부에서는 지반이 접선방향으로 인장되며 라이닝에는 축력이 증가하였다. 라이닝의 변위는 지반이 법선방향으로 압축되어지면 그 지점에 (-)모멘트가 발생되고 접선 방향으로 압축 되어지면 축력이 증대되는 것을 볼 수 있다(Fig. 5(a)).

b. $K_0 = 2$

측방향 하중이 우세하여 터널주변 측방향의 지반에서는 모두 압축응력이 발생되며 천단부에서는 인장응력이 나타났다. 측방향의 압축응력으로 인하여 라이닝의 거동은 바다부를 기점으로 상승 거동을 보였으며 측압

이 $K_0 = 1$ 일 때 보다 큰 응력의 2차 재분배가 발생하였다(Fig. 5(b)).

c. $K_0 = 0.5$

상향의 하중이 우세하게 작용되었을 때 나타나는 터널의 전형적인 거동이 보여진다. 지반 접선방향의 응력은 측부에서 압축응력이, 천단부에서 인장응력이 발생되었으며 법선방향의 응력은 이와 반대의 경향을 보여 주어 전형적인 터널의 거동특성을 확인 할 수 있다. 측부에서 접선방향으로 지반이 압축되면서 복공의 축력이 증가 되었고 천단부에서는 접선 방향의 응력은 인장축으로, 법선방향 응력은 압축축으로 거동하여 응력해방에 의해 터널지반은 안정축으로 거동하였다(Fig. 5(c)).

3.4 지반과 라이닝의 상호작용

터널의 굴착으로 인한 응력해방으로 주변지반 응력의 재분배가 발생하고 이로 인한 지반의 변형이 슛크리트에 영향을 미치게 된다. 슛크리트 라이닝이 타설되는 터널에서는 지반과 라이닝이 일체화되어 거동하므로 응력해방에 따른 지반의 변형이 라이닝에 직접적인 영향을 주게된다(H. Einstein과 W. Schwartz, 1979). 지반과 일체화된 슛크리트 라이닝은 일반적으로 외부하중을 받지 않는 콘크리트 라이닝과 같은 축력모델과는 달리 일체모델로 거동하는 특성을 보이며 슛크리트에 압축력 뿐만 아니라 일부에서 인장력이 작용하는 것으로 나타났다. 콘크리트 라이닝과 같은 축력모델의 경우 라이닝 전반에 축력이 전체적으로 증가하는 경향을 보이지만 지반과 일체화된 슛크리트 라이닝의 경우 일부에서는 압축응력이 줄어들며 인장응력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 지반과 라이닝의 상호관계를 비교하여 슛크리트의 거동 특성을 보다 명확히 규명하였다.

지반응력은 Steel Lining에 근접하여 부착하여 법선방향 응력과 접선방향 응력을 측정하였다. 지반의 법선방향 응력의 경우 인장(+)이 나타나면 지반이 터널의 내공 단면쪽으로 밀려들어오는 경우이고 압축(-)인 경우는 지보재가 지반을 지지하면서 생기는 지반의 압축 현상이라 볼 수 있다.

지반의 접선방향 응력의 경우 인장(+)이 나타나면 지반이 터널의 접선방향으로 인장되어지며 이 부분의 슛크리트 라이닝의 축력은 감소하게 된다. 또한 압축(-)인 경우는 지반이 터널의 접선방향으로 압축되어지며 이 부분의 슛크리트 라이닝의 축력은 증가하게 된다.

지반의 법선방향의 응력은 슛크리트 라이닝의 거동특성에서 모멘트도와 관련지어 살펴보면 쉽게 이해가 된다. 굴착에 의한 슛크리트 라이닝의 거동형상은 모멘트도를 분석하여 거동을 쉽게 예측할 수 있다. 천단을 기

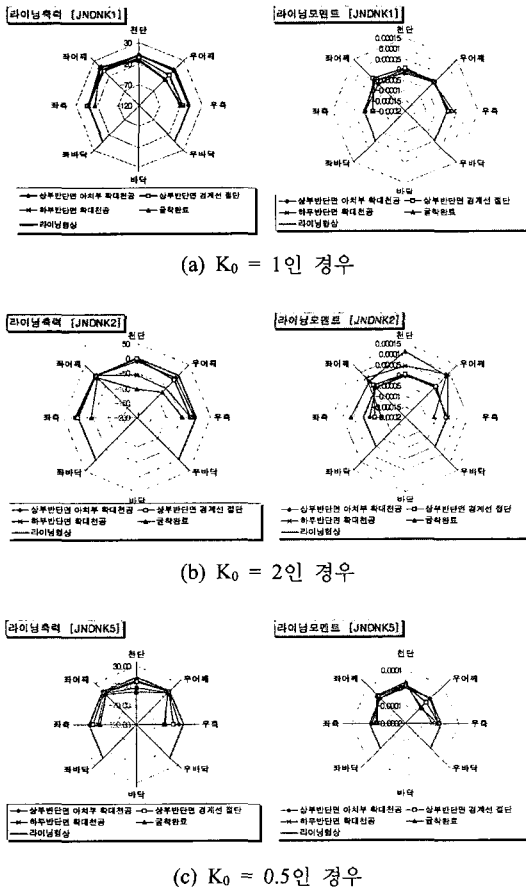


Fig. 5. Axial force and moment of the Lining

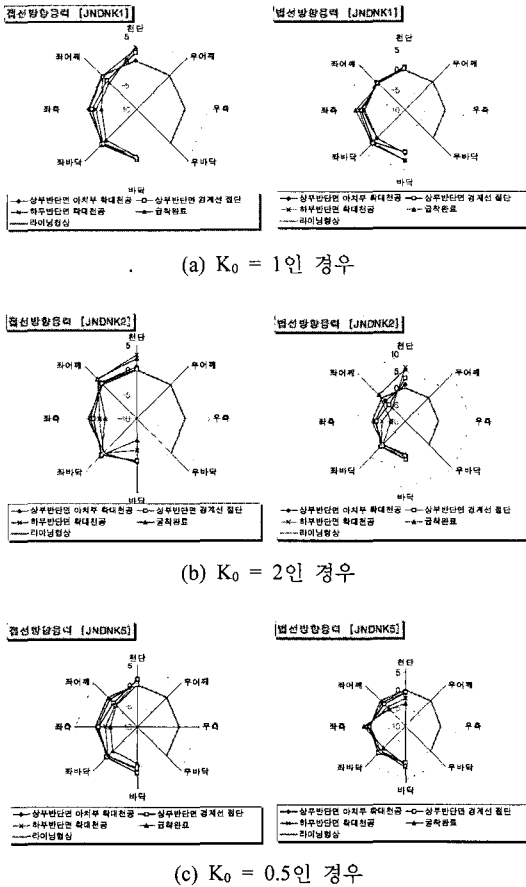


Fig. 6. Normal and tangential stress of the ground near to tunnel lining

준으로 양(+)의 모멘트는 \cap , 음(-)의 모멘트는 \cup 모양의 휨이 작용하는 것이다(Fig. 6).

실험결과 지반과 슛크리트 라이닝이 부착되어 있는 경우 측압이 작으면 지반과 슛크리트 라이닝 사이에 큰 전단응력이 작용하여 슛크리트 라이닝에 인장응력이

발생되며 측압이 큰 경우에는 작은 전단응력이 작용하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 시험에서는 모형시험 과정에서 슛크리트 두께 만큼 미굴착 하므로써 굴착과 동시에 슛크리트가 설치되는 것으로 가정하였다. 그러나 실제에 있어서는 굴착이 종료된 후 슛크리트가 타설되므로 어느정도의 응력이 완이 발생한 후에 슛크리트 라이닝이 설치되게 된다.

하부반단면 굴착을 기점으로 접선방향의 응력은 압축에서 인장으로, 법선방향의 응력은 인장에서 압축으로 전환된다. 이때 법선방향의 응력과 접선방향의 응력 전이는 대략 98.07 kPa로서 응력 해방에 의해 발생하는 2차 재분배 응력의 10%~30%에 해당되는 응력이다.

굴착에 의한 최종 변형량을 기준으로 굴착단계별 응력 해방율은 천단변형량을 기준으로 산정한 결과 상부경계선 확대천공시 9%, 상부반단면 아치부 확대천공시 15%, 상부반단면 경계선 절단 즉시 48%, 안정화 후 하부반단면 굴착전 94%의 응력 해방율이 나타났다.

지반과 슛크리트가 부착되어 있어 지반응력이 슛크리트 라이닝에 반영된다.

참고문헌

1. 이상덕, 최수일, 구자갑, 1994, 안정된 지하구조물의 설계 및 시공.
2. 윤지선, 김선명, 2002, a, Single Shell NATM의 설계(I), (사)한국터널공학회지 4.1, 73-86.
3. 윤지선, 김선명, 2002, b, Single Shell NATM의 설계(II), (사)한국터널공학회지 4.1, 72-80.
4. H. Einstein and W. Schwartz, 1979, Simplified Analysis for Tunnel Supports, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Vol. 105, No. GT4, 499-518.
5. N.R.Barton, 1998, NMT support concepts for tunnels in weak, World Tunnel Congress'98 on Metropolis Brazil, 273-279.



김 동 갑

1980년 고려대학교 이과대학
지질학과 학사
1984년 고려대학교 대학원
지질학과 석사
2004년 아주대학교 대학원
건설교통공학과 박사과정
Tel: 031-380-8250
E-mail: dgkim@kumhoeng.co.kr
현재 금호엔지니어링(주) 근무



박 승 준

2001년 삼척대학교 공과대학
토목공학과 학사
2003년 아주대학교 대학원
건설교통공학과 석사
Tel: 02-3433-3365
E-mail: mcdba@korea.com
현재 (주)삼보기술단 근무



이 상 덕

1980년 서울대학교 공과대학
토목공학과 학사
1982년 서울대학교 대학원
토목공학과 석사
1987년 독일 Stuttgart 대학교 대학원
토목공학과 공학박사
Tel: 031-219-2503
E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr
현재 아주대학교 환경건설교통공학부 교수