

# 사질토지반에서 터널굴착시 막장안정을 위한 폐합비에 관한 연구

## A Study on the Closure Ratio for Tunnel Face Stabilization during Tunnel Excavation in Sand Soil

김 상 환<sup>1</sup> Kim, Sang-Hwan

김 지 태<sup>2</sup> Kim, Ji-Tae

임 채 호<sup>3</sup> Lim, Chae-Ho

이 인 근<sup>4</sup> Lee, In-Keun

### Abstract

This paper presents experimental and numerical studies on the closure ratio of tunnel face to reduce pressure and displacement occurring at tunnel face during tunnel excavation. In experimental study, model tests are carried out according to the closure ratio of tunnel face and tunnel depth. Model test results are analyzed and interpreted by numerical calculation in order to verify results obtained from experimental and numerical studies. It is clearly found that tunnel face stability increases with the increase of the closure ratio of tunnel face. The results also show that tunnel face is stable when the closure ratio of tunnel face is larger than 80%. This research will be very useful to develop the economical tunnel face closing system.

### 요 지

본 논문은 터널 굴착시 막장면 안정성 확보를 위한 막장폐합비에 따른 막장면 응력 및 지반거동을 분석하기 위해 실내모형실험 및 수치해석적 분석을 실시하였다. 실내모형실험에서는 터널막장면의 폐합비와 토피고에 따른 막장면 응력 및 지반의 거동을 실험하였다. 실내모형실험 결과를 검증하기 위하여 2차원 수치해석을 실시하였으며 이들 서로의 결과들을 비교 분석하였다. 그 결과 막장 폐합비가 증가할수록 터널 막장면 안정성 확보가 가능할 것으로 판단되며 막장 폐합비가 80% 이상일 경우에는 막장 안정성에 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 이러한 연구결과는 향후 경제적인 터널 막장폐합시스템을 개발하는데 매우 유용할 것으로 기대된다.

**Keywords :** Closure ratio of tunnel face, Laboratory model test, Sprayed concrete

### 1. 서 론

고도의 산업 발달과 급속한 경제 성장에 따라 도심지역의 교통 문제 해소를 위해 지하철, 지하철도 등 지하공간의 효율적인 이용에 대한 필요성이 증대되면서 지하

공간의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 지하공간을 개발하기 위해 주로 사용되고 있는 NATM공법은 발파에 의해 암반굴착 직후 원지반의 지지능력을 최대한 활용 하면서 쏫크리트(Shotcrete)와 록볼트(Rock bolt) 등을 주시보재로 사용하여 터널의 안정성을 유지시키는 공법

1 정희원, 호서대학교 토목공학과 교수 (Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University, kimsh@hoseo.edu, 교신저자)

2 정희원, 호서대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate student, Dept of Civil Engineering, Hoseo University.)

3 비희원, 호서대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate student, Dept of Civil Engineering, Hoseo University.)

4 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Professor, Department of Civil Engineering, University of Seoul.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이다. 그러나 지층이 연약하거나 토피가 얇은 지반 혹은 단층대와 같이 불균질지반에 터널을 굴착하는 경우, 숏크리트와 록볼트로 지보가 되어 있다하여도 막장면의 자립성 저하 및 이에 따르는 터널 주변지반의 과도한 이완 등으로 인해 터널의 안정성이 저하되어 결국 붕괴에 이르는 사고사례가 상당수 보고되고 있다(최용기, 2004). 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 터널 보조공법의 선택이 중요하다. 터널 보조공법 중에서 막장면의 안정을 위한 막장면 숏크리트 공법은 막장면에 숏크리트를 타설하여 막장면의 굴곡을 완화시켜 응력집중을 분산시키고, 암괴의 절리에 따른 이동을 숏크리트의 전단저항력에 의해 막는 효과를 기대한다. 또한 오랫동안 굴착작업이 중단되는 경우에는 그 기간 중 막장의 강도 약화방지를 위해 막장면 전체에 숏크리트를 시공한다.

터널 막장면 보조공법의 관한 국외연구로는 간단한 실내실험결과로부터 터널막장의 안정성에 대한 안정비를 제안하였으며(Broms와 Bennemark, 1967) 이를 기초로 추가적인 연구들이 다양하게 수행되었다(Davis et al, 1980; Uriel and Sagaseta, 1989). 특히, 터널막장의 안정성에 대하여 기초의 지지력계수와 같이 무차원 터널안정계수를 제안하였다(Atkinson과 Mair, 1993). 국내연구로는 강관 보강형 다단 그라우팅 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구(김창용 등, 1998)와 터널 시공시 수평보강재를 막장에 설치한 후 막장의 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구를 수행하였다(유충식과 신현강, 1999).

국내·외 터널 막장면 보강공법에 대한 조사 및 분석

을 실시한 결과 일본의 경우 매우 세부적으로 보강공법을 분류하고, 이에 대한 사례 등도 지속적으로 분석하고 있는 반면, 국내에서는 아직까지도 체계화된 보강공법 적용사례에 대한 통계 분석이나 연구가 미흡한 실정이다.

위와 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 터널 막장 폐합비에 따른 지반 상부응력 및 침하량에 대한 연구결과에 의하면 터널 굴착시 야기되는 지반의 상부응력과 지표면의 침하량을 감소시키기 위한 최적의 터널 막장 폐합비가 80% 이상일 경우에는 막장 안정성에 큰 문제가 없는 것으로 나타났다(김상환 등, 2010).

본 논문에서는 선행연구와 향후 계속적으로 연구가 이루어지는 것으로 선행연구를 검증하기 위해 추가적인 실험을 실시하였다. 이 연구를 위해 터널 막장 안정성에 대하여 터널 막장폐합비와 토피고에 변화를 주어 터널 막장면에 작용하는 막장면 응력 및 지반거동을 분석하기 위해 실내모형실험을 실시하였으며, 이 결과를 검증하기 위해 수치해석을 실시하였다.

## 2. 막장폐합공법에 따른 막장면 안정성

터널에서 대부분의 붕괴는 터널 시공시 막장면에서 발생한다. 연약지반이나 연약암반지반의 터널 굴착시 막장면에서의 주요 붕괴 원인은 막장 자체의 저항력 부족으로 인한 붕괴이다.

그림 1은 터널 굴착시 막장의 파괴 형태를 유형별로 나열한 것으로 그림 1(a)는 상반 굴착 후 터널 하부의 구조적 결함에 의해 파괴되는 것을 나타내고 있다. (b)

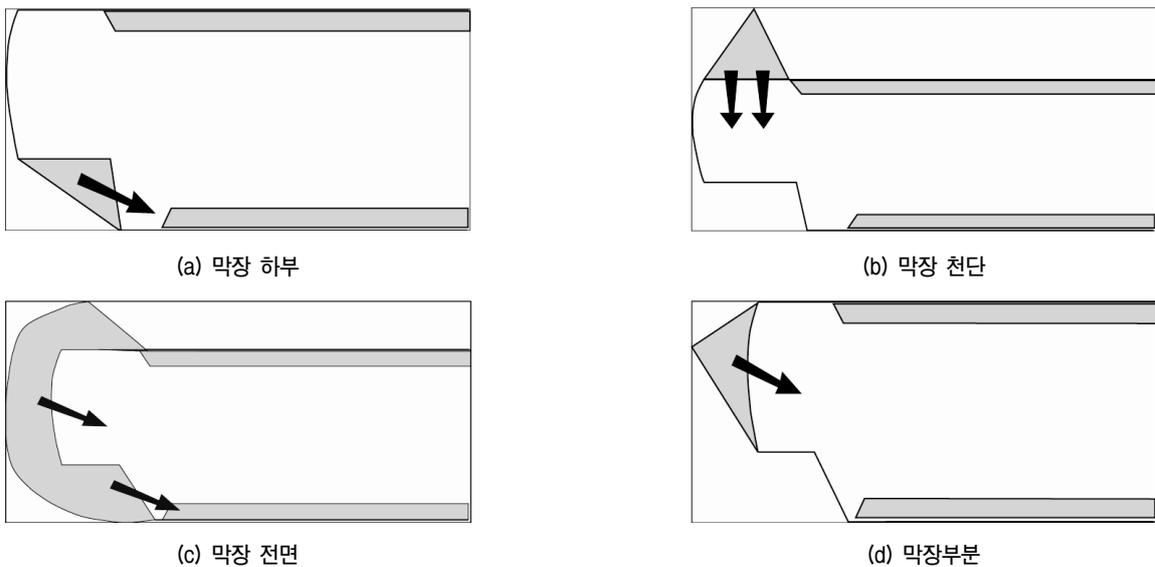


그림 1. 막장의 파괴유형

는 천단부에 형성된 절리에 의해 썬기형태 파괴가 나타나고 있다. (c)는 막장 주변이 연약층으로 형성되어 있는 경우 굴착으로 인하여 주변지층의 자립력이 파괴강도를 넘어 막장 전체의 붕괴를 표현한 것이다. 그리고 (d)는 연약한 막장 주변지반에 키블록(Key block)이 형성되어 붕괴되는 형상을 나타낸 것이다.

그림 2는 터널 막장면에서 지표면까지의 파괴 형태를 나타낸 것으로 그림 2(a)는 막장부분이 연약할 경우 막장에서 지표면까지 슬라이딩 파괴현상을 나타낸 것이다. (b)는 터널 천단부분이 연약하여 천단에서 파괴되는 형태를 표현한 것이며 (c)는 지하수의 영향으로 표토층이 얇아져 지반이 함몰되어 붕괴되는 형태를 나타낸 것이다(백두현, 2007).

터널 막장 안정성에 영향을 주는 요소가 여러 가지 있으므로 지보압을 산정하여 지반의 안정성을 평가하는 것은 매우 중요하다. 지보압 산정방법에는 여러 가지가 있으며 그 중 지보압이 터널의 천단과 지반으로 분배되는 것을 고려한 자중에 의한 지보압 산정방법과 2차 포물선 방정식에서 재료의 강성은 천단부로 전이된다고 가정하여 지보압( $P$ )을 산정하는 방법 등이 있다. 또한 Vermeer과 Ruse(2001)는 수치해석적 연구를 통해 지반 특성을 이용한 지보압( $P$ ) 산정 방법을 제시하기도 하였다.

이렇게 산정된 지보압을 이용하면 다음 식과 같이 막

장면의 안전율( $N$ )을 구할 수 있다.

$$N = \frac{q - P + \gamma(h + r_0)}{c}$$

여기서  $\gamma$  : 단위중량,

$q$  : 수직하중,

$r_0$  : 터널의 반지름,

$h$  : 토피고,

$c$  : 점착력,

$P$  : 지보압

지보압을 이용한 안전율 분석을 통하여 막장면의 안정성을 파악하고 불안정한 막장면의 보강유무를 결정할 수 있다.

터널 막장폐합비에 따른 지반 응력 및 침하량에 대한 연구(김상환 등, 2010)결과에 따르면 터널 굴착시 야기되는 지반의 응력과 지표면의 침하량을 감소시키기 위한 최적의 터널 막장 폐합비는 그림 3과 같이 막장 폐합비가 80% 이상일 경우 막장면 안정성에 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

이러한 막장면의 붕괴메카니즘 및 안정성에 대한 모형실험과 수치해석적 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있으나 이러한 연구들을 통해 경제적이며 시공성

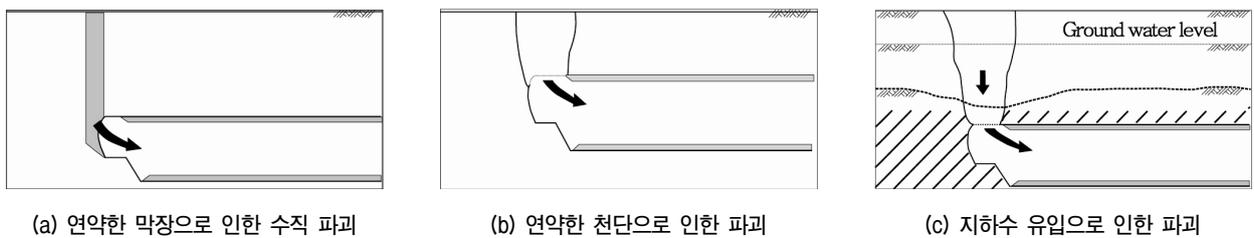
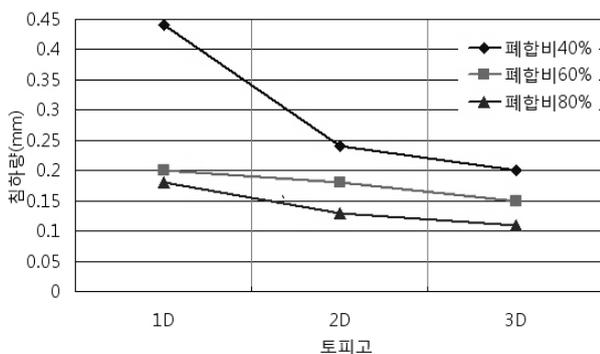
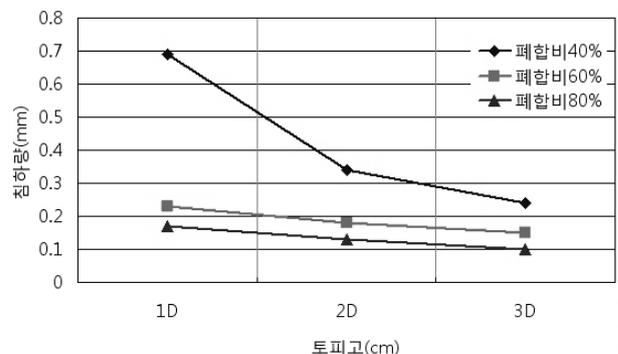


그림 2. 지표면의 파괴형태



(a) 굴진장 2D의 최대 침하량



(b) 굴진장 3D의 최대 침하량

그림 3. 토피고에 따른 굴진장 2D, 3D의 최대 침하량(김상환 등, 2010)

이 우수한 막장면 보강공법에 대한 개발은 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 선행연구와 향후 계속적으로 연구가 이루어지는 것으로 선행연구인 김상환 등(2010)은 실내모형실험 및 수치해석을 통해 막장 폐합비에 따른 막장면에 작용하는 막장 상부 응력과 지표면의 침하량을 측정하는 것이며 본 연구에서는 최적의 막장면 폐합비 80%에 대한 현장 적용성 평가전 실내모형실험 및 수치해석을 실시하였다.

### 3. 실내모형실험

본 연구는 사질토지반 내에서 터널 굴착시 막장면 폐합비에 따른 지반거동을 파악하기 위하여 실내모형장비를 제작하였으며 실험 지반의 균질성을 확보하기 위하여 주문진 표준사로 지반을 모델링하였다.

#### 3.1 실험 Case

기존의 연구자료를 바탕으로 하여 지중응력과 지표면침하 이외에 터널의 막장면에서의 응력분포 및 터널 천단부 변위발생 양상을 비교·분석하기 위하여 다음과 같은 축소모형실험을 실시하였다. 실험에 사용된 막장 폐합비는 기존의 전면을 보강하는 막장면 슛크리트 보강공법이 아닌 안정적이며, 경제적인 최적의 막장 폐합비를 선정하기 위하여 폐합비 40%, 60%, 80%를 선정하였다. 실내모형실험 굴착시 지반의 거동을 분석하기 위하여 그림 4와 같이 직경(D) 160mm 높이(H) 80mm의 반원형 터널을 적용하였다. 또한 토피고에 따른 지반거

동을 분석하기 위해 토피고 1D, 2D, 3D로 산정하였다.

#### 3.2 실험 방법

실험에 사용한 모형 토조는 그림 5와 같이 아크릴과 프레임을 이용하여 가로, 세로, 높이 850×600×1200(mm)로 제작하였다. 실험지반의 균질성을 확보하기 위하여 주문진 표준사로 지반을 모델링하였다. 실험데이터 값의 신뢰성을 위해 일정한 높이를 유지하여 강사하였으며, 지반 물성치는 표 1과 같다.

실내모형실험에 사용된 아크릴의 휨응력은 0.845Mpa라고 규정 “HANDBOOK OF ACRYLICS(2003. p.180,183)”하고 있으며 이 값에 안전율(11.25)과 이음부분에 대한 강도감소계수(0.85)를 고려하여 아크릴의 허용 휨압축응력을 0.0638MPa로 산정할 수 있다. 슛크리트의 허용 휨압축응력은  $0.4f_{ck}=0.4 \times 210=8.4\text{MPa}$  임으로 본 연구에서는 막장면 슛크리트를 모사하기 위하여 2mm 두께의 PC (Polycarbonate)아크릴로 실제 막장면 슛크리트 두께( $t=30\text{mm}$ , 터널표준시방서(2009))에 대한 축소율 1/15로 적용시켰다.

터널 굴착시 Trap door장비를 사용하여 막장 폐합비 (40%, 60%, 80%)에 따른 토피고를 변화시켜 실험을 실시하였다. 실험 도중 터널굴착에 의해 발생하는 막장면 응력을 측정하기 위해 그림 6과 같이 터널 막장 상부, 중앙부, 어깨부에 응력센서(PDA-200k)를 설치하였으며 이때 중앙부 응력센서는 가로, 세로, 두께(15mm, 15mm, 5mm)의 아크릴을 이용하여 실험기 정면 아크릴에 부착하였다.

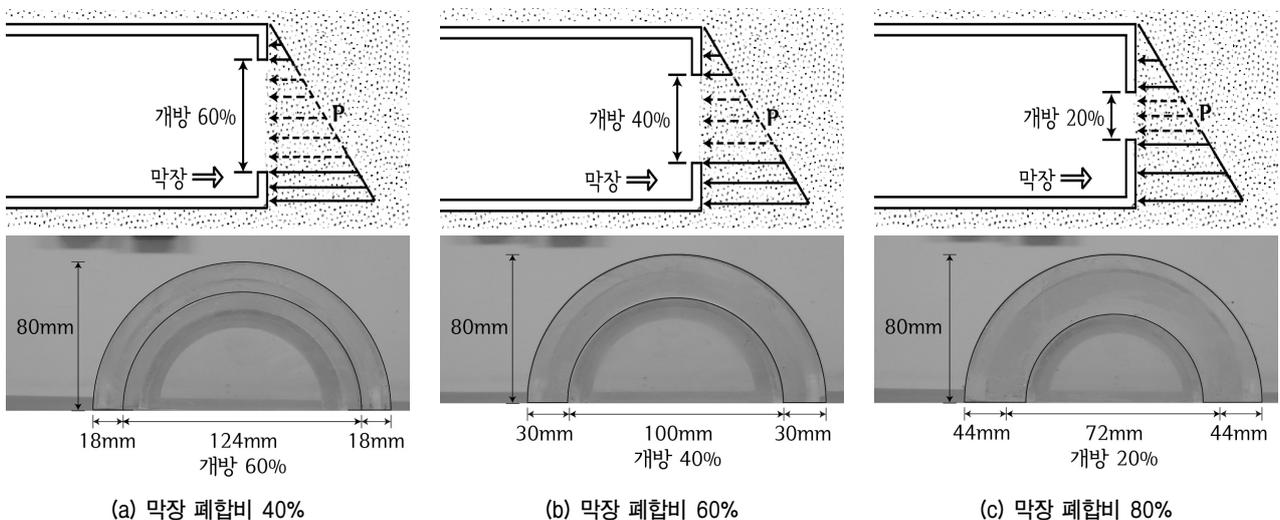


그림 4. 막장 폐합비에 따른 실험 Case

표 1. 지반 물성치

비중 (Gs)	유효입경D 10(mm)	균등계수 (Cg)	곡률계수 (Cc)	최소건조밀도 (t/m <sup>3</sup> )	최대건조밀도 (t/m <sup>3</sup> )	최대간극비 (e <sub>max</sub> )	최소간극비 (e <sub>min</sub> )
2.63	0.331	1.93	10.9	1.358	1.594	0.934	0.65

토포고에 따른 지반거동을 측정하기 위해 토포고 1D 일 때 지반 조성시 각 막장상부 0.5D, 1D에 Strain gauge를 설치하였다. 토포고 2D일 때 지반 조성시 각 막장상부 0.5D, 1D, 1.5D, 2D에 Strain gauge를 설치하였으며, 토포고 3D일 때 지반 조성시 각 막장상부 0.5D ~ 3.0D에 Strain gauge를 설치하였다. 또한 터널 굴착시 굴진거리를 측정하기 위하여 Trap door 우측에 Wire LVDT를 설치하여 굴진거리를 측정하였다. 지반조성 완료 후 Trap door 우측에 설치되어 있는 레버를 돌려 터널모형이 설치된 가동판을 1mm 씩 10단계로 나누어 굴착을 실시하여 이때 터널 막장면에 발생하는 막장 응력 및 지반변위를 각각 응력센서와 변위센서를 이용하여 측정하였다. 막장 폐합비 100%는 지표면의 침하량과 막장의 수직응력의 변화가 미미하여 본 실험에서 제외하였다.

#### 4. 실험 결과 분석

실내모형실험을 통해 사질토지반 내에서 터널 굴착시 막장폐합비에 따른 지반거동을 분석하기 위하여 그림 6과 같이 막장면 천단에 작용하는 응력과 지반변위를 각각 압력센서(PDA-200k)와 변위센서(Strain gauge)를 설치하여 측정하였다. 터널 굴착은 1mm 씩 총 10단계로 나누어 그림 7과 같이 굴착을 실시하였으며, 굴착 후 막장면 응력 및 지반 변위를 측정하였다.

##### 4.1 토포고와 폐합비에 따른 막장면 응력 계측 결과

막장면 천단응력은 그림 6과 같이 각 막장면 천단부, 어깨부, 중앙부에 각각 응력센서(PDA-200k)를 설치하였으며, 다음 그림은 막장 폐합비에 따른 터널 굴착시 막장면 응력을 나타낸 그래프이다.

그림 8과 같이 토포고 1D(150mm)에서의 터널 굴착시 막장면에 작용하는 응력을 비교한 결과 막장면 폐합비가 증가할수록 응력이 감소하는 경향이 나타났다. 폐합비 40%의 경우 막장면 최대응력이 4.74kPa인데 반해 폐합비 60%일 때 막장면 최대응력이 2.82kPa로 약 59.49% 감소하는 것으로 나타났으며, 막장면 폐합비 60%와 80%

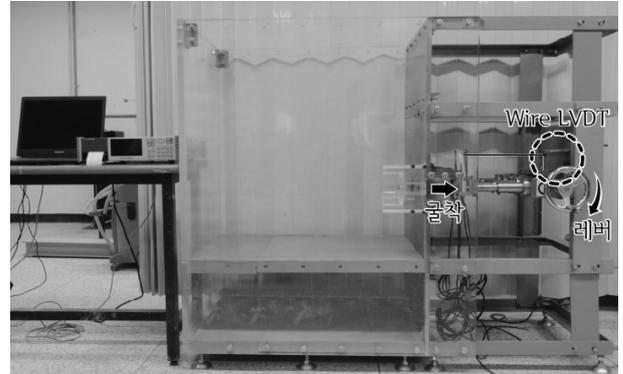


그림 5. 실내모형시험 토조 및 실험장비

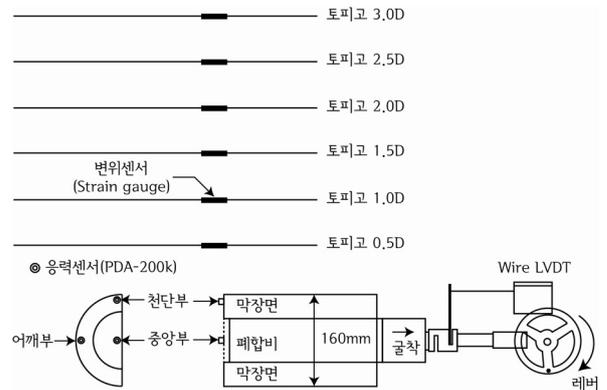


그림 6. 계측 계획

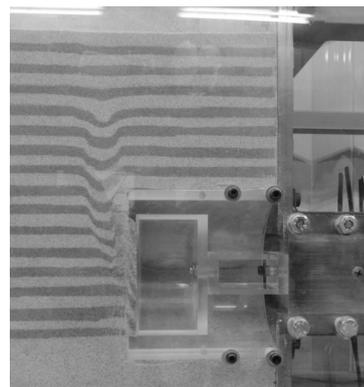
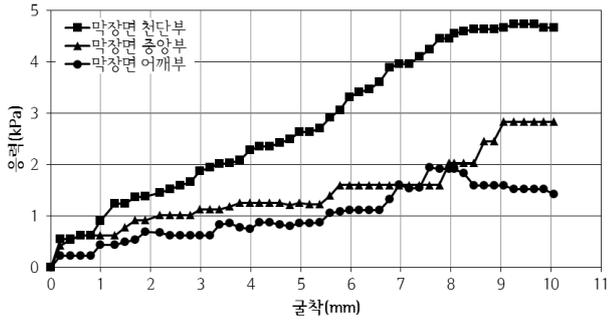


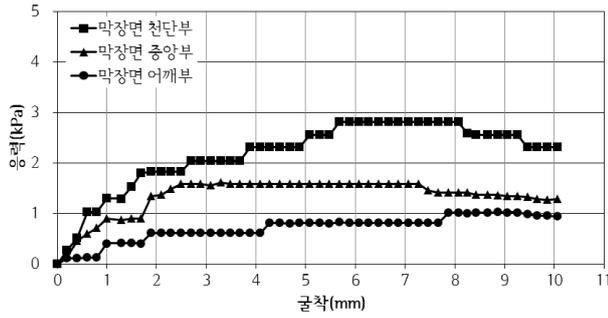
그림 7. 실내모형실험

를 비교했을 때 폐합비 80%의 경우 최대응력이 0.81kPa로 약 28.72% 감소하는 것으로 나타났다.

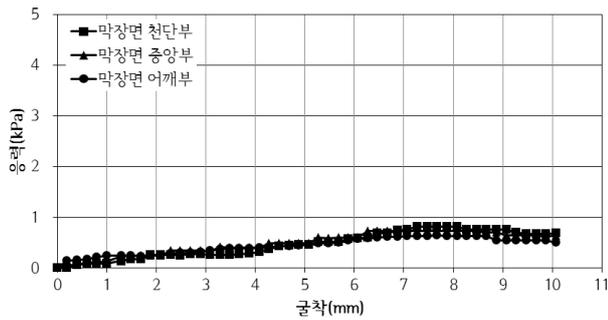
그림 9와 같이 토포고 2D(300mm)에서의 터널 굴착시 막장면에 작용하는 응력을 비교한 결과 그림 8과 같



(a) 폐합비 40%



(b) 폐합비 60%

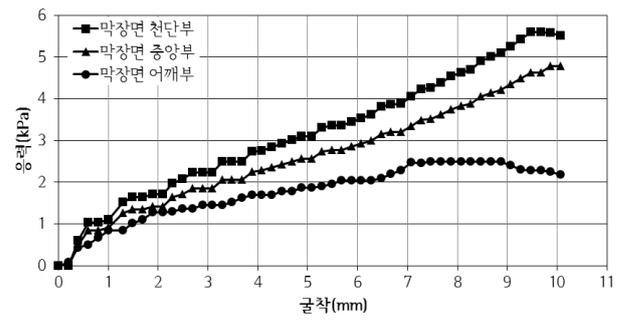


(c) 폐합비 80%

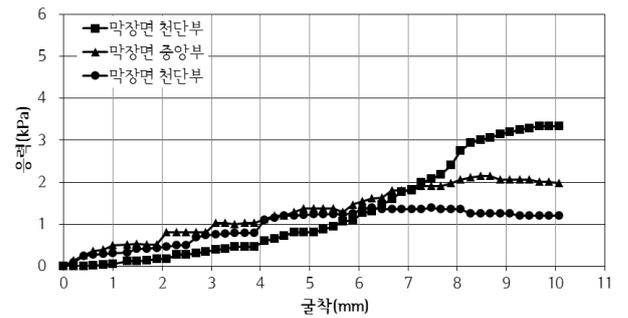
그림 8. 폐합비에 따른 토피고 1D에서의 막장면 응력

이 비슷한 경향이 나타났다. 폐합비 40%의 경우 막장면 최대응력이 5.60kPa인데 반해 폐합비 60%일 때 막장면 최대응력이 3.34kPa로 약 59.64% 감소하는 것으로 나타났으며, 막장면 폐합비 60%와 80%를 비교했을 때 폐합비 80%의 경우 최대응력이 1.12kPa로 약 33.53% 감소하는 것으로 나타났다.

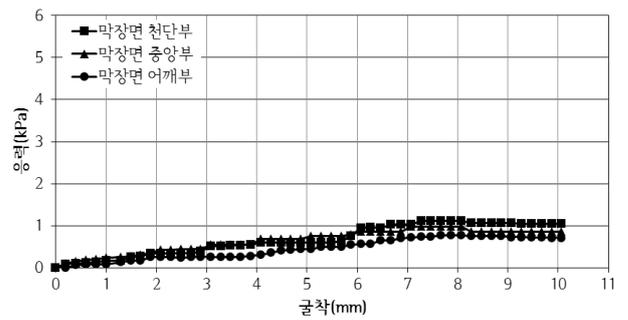
그림 10과 같이 토피고 3D(450mm)에서의 터널 굴착시 막장면에 작용하는 응력을 비교한 결과 그림 9와 같이 비슷한 경향이 나타났다. 폐합비 40%의 경우 막장면 최대응력이 6.47kPa인데 반해 폐합비 60%일 때 막장면 최대응력이 3.97kPa로 약 61.36% 감소하는 것으로 나타났으며, 막장면 폐합비 60%와 80%를 비교했을 때 폐합비 80%의 경우 최대응력이 1.63kPa로 약 41.06% 감소하는 것으로 나타났다. 토피고와 막장폐합비에 따른 터널 굴



(a) 폐합비 40%



(b) 폐합비 60%



(c) 폐합비 80%

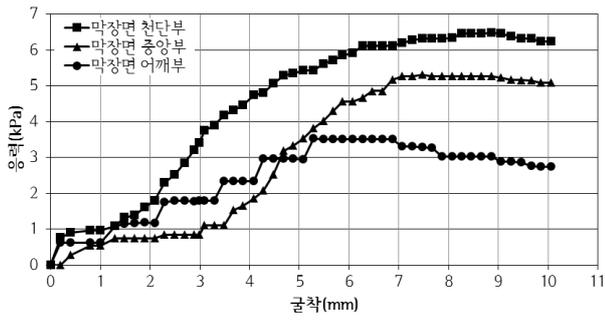
그림 9. 폐합비에 따른 토피고 2D에서의 막장면 응력

착시 막장면에 작용하는 응력을 분석한 결과 막장폐합비 40%와 60%에서는 근사한 경향을 나타냈으며, 반면에 막장폐합비 60%와 80%에서는 토피고가 증가할수록 막장면에 작용하는 응력이 증가하는 경향이 나타났다.

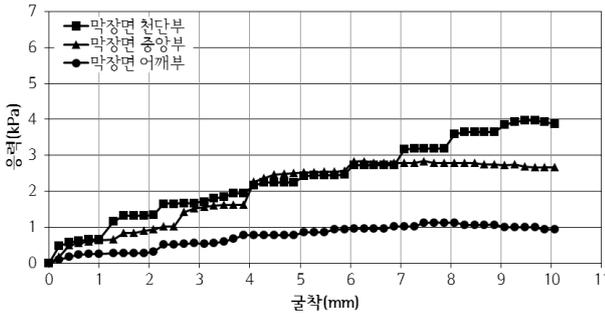
#### 4.2 토피고와 폐합비에 따른 지반 변위 계측 결과

지반 변위는 그림 6과 같이 지반 조성시 각 막장 상부 토피고 0.5D~3.0D에 Strain gauge를 설치하여 측정하였으며, 다음 그림은 막장 폐합비와 토피고에 따른 막장 굴착시 지반 변위를 나타낸 그래프이다.

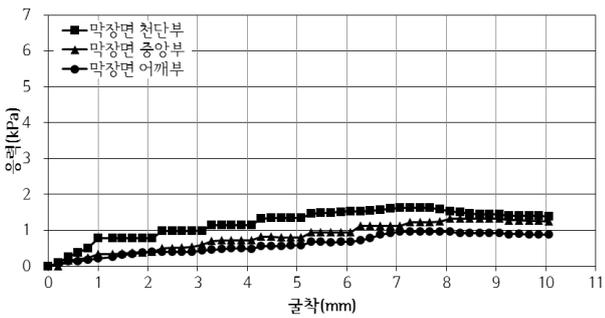
그림 11과 같이 토피고 0.5D, 1.0D에서의 지반 변위를 비교해 본 결과 토피고가 증가할수록 지반 변위는 감소하는 경향이 나타났다. 폐합비 40%의 경우 토피고



(a) 폐합비 40%

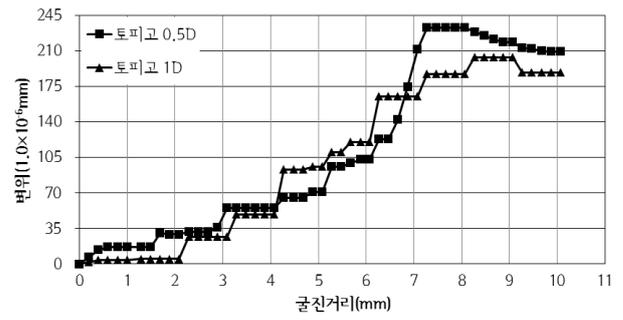


(b) 폐합비 60%

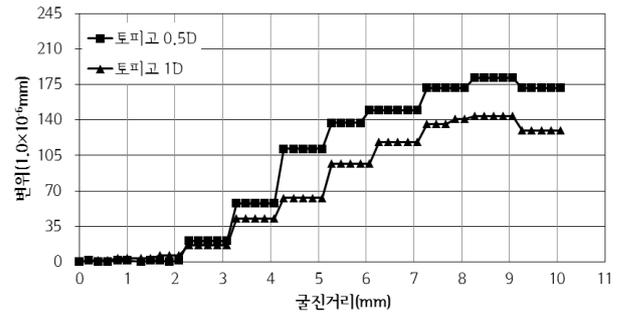


(c) 폐합비 80%

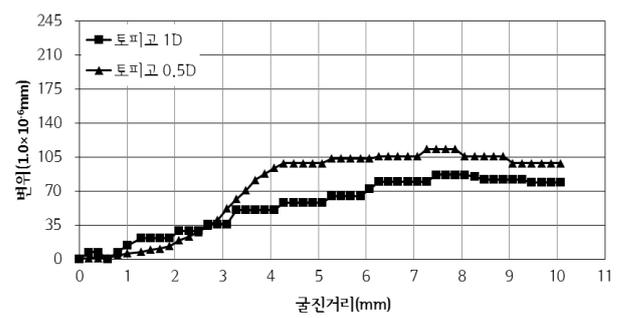
그림 10. 폐합비에 따른 토피고 3D에서의 막장면 응력



(a) 폐합비 40%



(b) 폐합비 60%



(c) 폐합비 80%

그림 11. 폐합비에 따른 토피고 1D에서의 막장면 응력

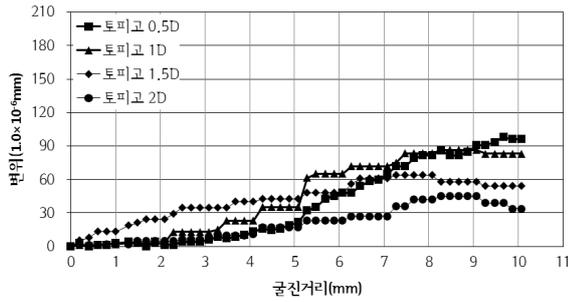
0.5D의 변위가 233( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)인데 반해 폐합비 60%의 토피고 0.5D의 변위가 182( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)로 약 21.75% 감소하는 것으로 나타났으며, 막장 폐합비 60%와 비교했을 때 막장 폐합비 80%의 토피고 0.5D의 변위가 113( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)로 약 37.91% 감소하는 것으로 나타났다.

그림 12와 같이 토피고 0.5D~2.0D에서의 지반 변위를 비교해 본 결과 그림 11과 같이 비슷한 경향을 보였으며, 폐합비 40%의 경우 토피고 0.5D의 변위가 183( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)인데 반해 폐합비 60%의 토피고 0.5D의 변위가 147( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)로 약 19.67% 감소하는 것으로 나타났으며, 막장 폐합비 60%와 비교했을 때 막장 폐합비 80%의 토피고 0.5D의 변위가 98( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)로 약 33.33% 감소하는 것으로 나타났다.

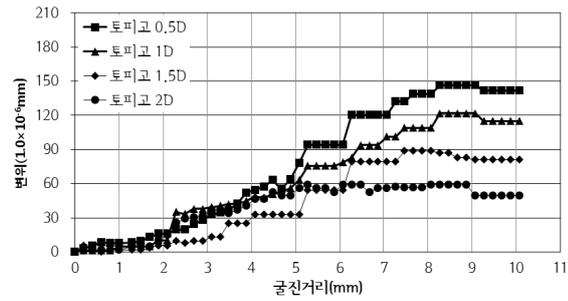
그림 13과 같이 토피고 0.5D~3.0D에서의 지반 변위

를 비교해 본 결과 그림 11과 같이 비슷한 경향이 나타났다. 막장 폐합비 40%의 경우 토피고 0.5D의 변위가 170( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)인데 반해 폐합비 60%의 토피고 0.5D의 변위가 113( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)로 약 33.53% 감소하는 것으로 나타났으며, 막장 폐합비 60%와 비교했을 때 막장 폐합비 80%의 토피고 0.5D의 변위가 83( $1.0 \times 10^{-6}$ mm)로 약 26.55% 감소하는 것으로 나타났다.

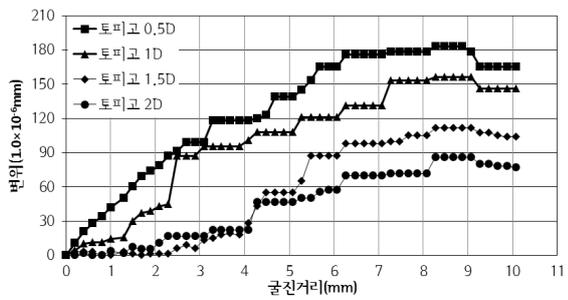
실험결과 폐합비가 증가할수록 막장면 응력 및 지반 변위가 감소하였으며, 또한 토피고가 증가할수록 막장면 응력은 증가하였으나 반면에 지반 변위는 감소하였다. 막장면에 숏크리트를 40%와 60% 폐합하였을 때 보다 막장면에 숏크리트를 80% 폐합하였을 때 막장면에 작용하는 응력과 지반변위가 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 폐합비 40%

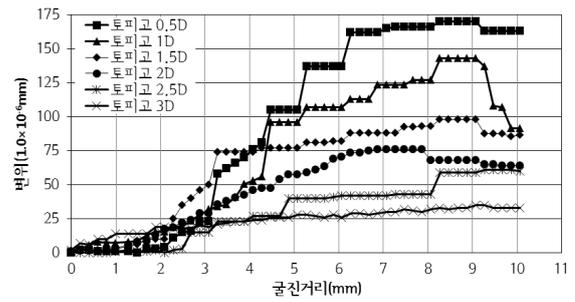


(b) 폐합비 60%

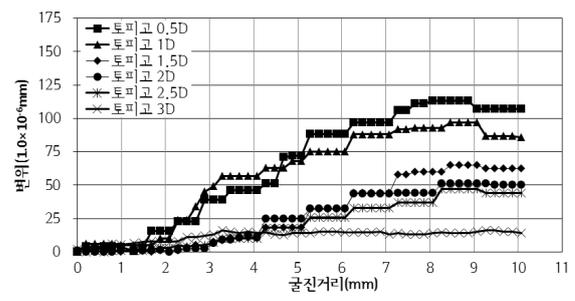


(c) 폐합비 80%

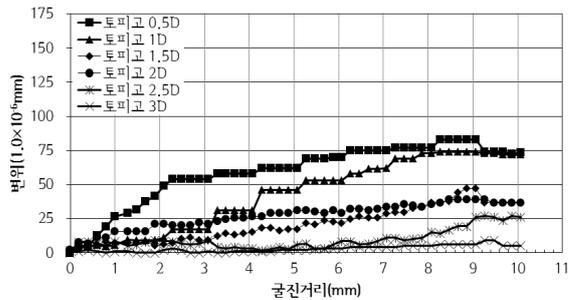
그림 12. 폐합비에 따른 토피고 2D에서의 막장면 응력



(a) 폐합비 40%



(b) 폐합비 60%



(c) 폐합비 80%

그림 13. 폐합비에 따른 토피고 3D에서의 막장면 응력

## 5. 수치해석을 통한 신뢰성 검토

본 연구에서는 실내모형실험에서 나타난 막장 폐합비에 따른 막장면 응력 및 지반의 거동을 검증하기 위해서 Visual FEA를 이용하여 2차원 유한요소해석을 실시하였다.

### 5.1 해석 과정 및 방법S

지반은 일반적으로 사용되고 있는 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb을 적용하였으며 실내모형실험과 동일한 조건의 수치해석을 실시하기 위하여 지반과 아크릴관의 마찰은 고려하지 않았으며 토압계수  $K_0=1.0$ 을 가정하였다(변위용 등, 2007). 해석조건은 그림 6과 같이 각 Case별 막장 폐합비와 토피고를 적용하여 막장면에 작용하는 막장면 응력과 지반 변위를 측정하였다.

유한요소해석에 사용된 지반물성치는 표 2와 같이 실내모형실험과 같은 사질토지반으로 가정하였으며 실내 실험에 사용된 아크릴관을 대신하여 터널 붕괴방지를 위해 슛크리트를 적용하였다.

막장 폐합비에 따른 보강효과를 검토하기 위한 검토 단면으로 막장 폐합비 40%, 60%, 80%, 100%에 대한 수치해석을 실시하였다. 또한 토피고(1D, 2D, 3D)에 따른 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 실제 시공을 모사하기 위하여 표 3과 같이 시공단계를 모델링하였다.

### 5.2 수치해석결과

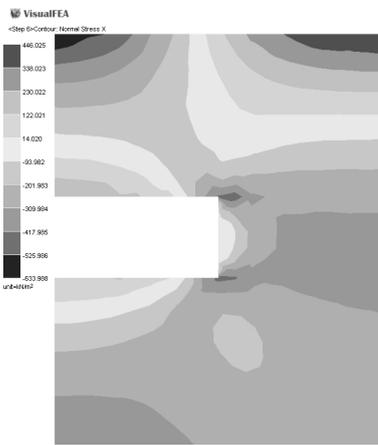
수치해석은 실내모형실험과 동일한 위치에서의 막장면 최대 응력과 지반의 최대 지반 변위를 측정된 결과 그림 14와 같이 나타났으며, 그 해석결과 그래프는 그림 15와 같이 나타냈다.

표 2. 해석 적용물성

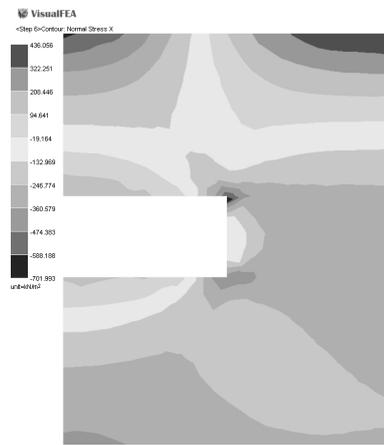
구 분	사질토	연한 슛크리트 벽체	굳은 슛크리트 벽체	연한 슛크리트 막장면	굳은 슛크리트 막장면
탄성계수(kPa)	$2.0 \times 10^4$	$5.0 \times 10^6$	$1.5 \times 10^7$	$5.0 \times 10^6$	$1.5 \times 10^7$
프아송비	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	19	23.5	23.5	23.5	23.5
점착력(kPa)	-	-	-	-	-
내부마찰각(°)	25	-	-	-	-
두께(m)	-	0.3	0.3	0.03	0.03

표 3. 시공단계

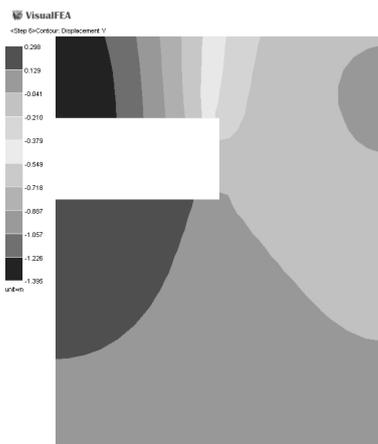
구 분	시공순서
1단계	지반초기화
2단계	굴착
3단계	연한 슛크리트 벽체
4단계	굳은 슛크리트 벽체 + 막장면
5단계	굳은 슛크리트 막장면



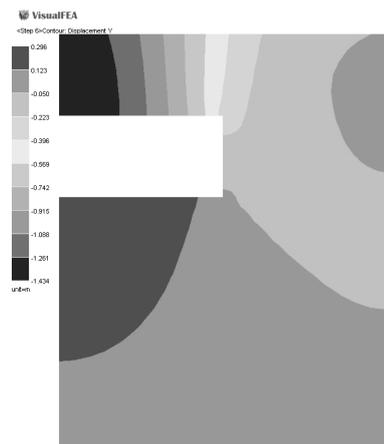
(a) 막장면 응력(폐합비 40%)



(b) 막장면 응력(폐합비 80%)



(c) 폐합비 40%(지반 변위)

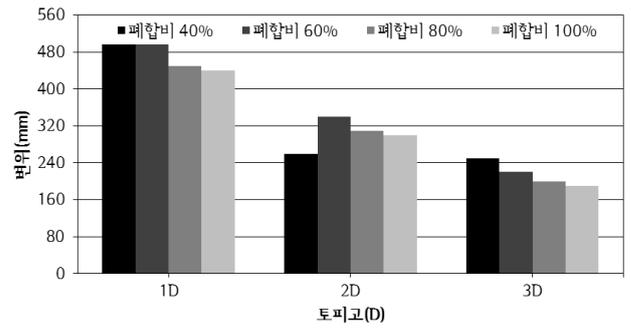
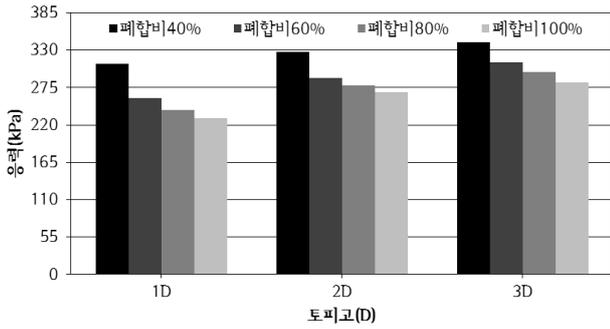


(d) 폐합비 80%(지반 변위)

그림 14. 수치해석결과

그림 15(a)는 폐합비에 따른 막장면 최대 응력을 나타낸 그래프로 폐합비가 증가할수록 막장면 응력이 감소하는 것으로 나타났으며, 토피고가 증가할수록 막장면

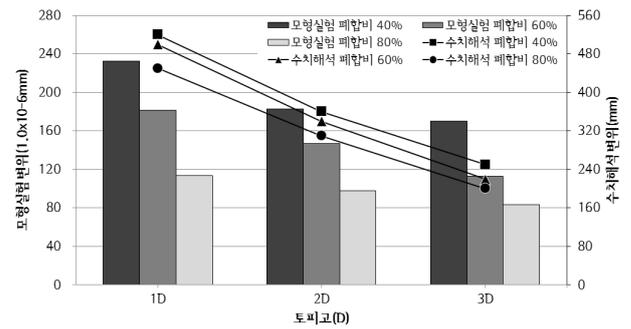
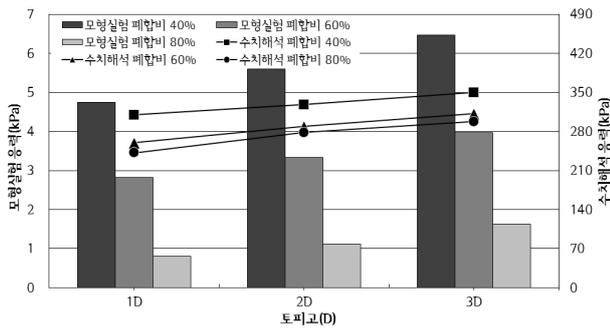
응력은 증가하는 것으로 나타났다. 막장 폐합비 40%일 때 토피고 3D에서 막장면 최대 응력이 350kPa로 가장 높게 나타났으며, 막장 폐합비 100%일 때 토피고 1D에



(a) 폐합비에 따른 막장면 최대 응력

(b) 폐합비에 따른 지반 최대 지반 변위

그림 15. 폐합비에 따른 막장면 응력 및 지반 변위



(a) 막장면 최대 응력

(b) 최대 지반 변위

그림 16. 막장폐합비에 따른 막장면 최대 응력 및 최대 지반 변위

서 막장면 최대 응력이 약 230kPa로 가장 적게 나타났다. 터널 굴착시 막장 폐합비 100%와 80%의 막장면 최대 응력은 토피고 1D, 2D, 3D일 때 각각 4.95%, 3.6%, 5.03%로 비슷한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그림 15(b)는 폐합비에 따른 최대 지반 변위를 나타낸 그래프로 폐합비가 증가할수록 지반 변위는 감소하는 것으로 나타났으며, 토피고가 증가할수록 지반 변위는 감소하는 것으로 나타났다. 막장 폐합비 40%일 때 토피고 1D에서 최대 지반 변위가 0.52mm로 가장 크게 나타났으며 막장 폐합비 100%일 때 토피고 3D에서 최대 지반 변위가 0.19m로 가장 적게 나타났다. 터널 굴착시 막장 폐합비 100%와 80%의 최대 지반 변위는 토피고 1D, 2D, 3D일 때 각각 2.22%, 3.22%, 5%로 비슷한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

## 6. 실내모형실험 결과와 수치해석 결과 비교·분석

그림 16은 막장폐합비에 따른 막장면 최대 응력 및 최대 지반 변위를 나타낸 그래프로 실내모형실험 결과와 수치해석 결과는 매우 유사한 거동을 나타냈다. 이때 분석결과는 수치해석의 경우 실제지반을 모사하였으며,

실내모형실험의 경우 실제 막장면 슛크리트 두께( $t=30\text{mm}$ )를 1/15로 축소율을 적용하였다.

그림 16(a)를 비교·분석한 결과 막장폐합비 40%일 때 토피고 3D에서 막장면 최대 응력이 각각 6.47kPa, 350kPa로 가장 높게 나타났다. 또한 막장폐합비 80% 이상일 때 토피고 1D에서 막장면 최대 응력이 각각 0.81kPa, 230kPa로 가장 적게 나타났다. 막장면 응력의 분포 및 양상에 따르면 앞에서 언급한 바와 같이 폐합비가 증가할수록 막장면 응력은 감소하는 경향이 나타났으며, 또한 토피고가 증가할수록 막장면 응력은 증가하는 경향이 나타났다.

그림 16(b)는 막장폐합비에 따른 최대 지반 변위를 나타낸 그래프로 실내모형실험과 수치해석을 비교·분석한 결과 막장폐합비 40%일 때 토피고 1D에서 최대 지반 변위가 각각 233mm, 520mm로 가장 높게 나타났다. 또한 막장폐합비 80%이상일 때 토피고 3D에서 최대 지반 변위가 각각 83mm, 190mm로 가장 적게 나타났다. 지반 변위의 분포 및 양상에 따르면 앞에서 언급한 바와 같이 폐합비가 증가할수록 지반 변위는 감소하는 경향이 나타났으며, 또한 토피고가 증가할수록 지반 변위는 감소하는 경향이 나타났다.

막장폐합비에 따른 터널 굴착시 막장면 응력 및 지반 변위를 비교·분석한 결과 막장면에 슛크리트를 40%와 60% 폐합하였을 때 보다 막장면에 슛크리트를 80%이상 폐합하였을 때 막장면에 작용하는 응력과 지반변위가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 막장면의 슛크리트를 80%이상 폐합할 경우 터널 굴착시 막장면 안정성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 7. 결 론

본 논문은 사질토지반 내에서 터널 굴착시 막장폐합비에 따른 막장면 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 막장 폐합비와 토피고를 변화시켜 실내모형실험 및 수치해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실내모형실험에서는 폐합비에 따른 터널 굴착시 막장면 응력 및 지반 변위를 분석한 결과 막장면에 슛크리트를 40%, 60% 폐합시켰을 때 보다 막장면에 슛크리트를 80% 폐합시켰을 때 막장면 응력이 약 58.84% ~ 71.13% 감소효과가 있는 것으로 나타났으며, 지반 변위는 약 26.55% ~ 37.91% 감소효과가 있는 것으로 나타났다.
- (2) 수치해석결과 막장면 슛크리트를 40%와 60% 폐합하였을 때 보다 막장면 슛크리트를 100%폐합하였을 때 막장면 응력 및 지반 변위가 감소하는 것으로 나타났으며, 터널 굴착시 막장면 슛크리트를 100%와 80% 폐합하였을 때 최대 막장면 응력 및 지반 변위가 5%미만으로 비슷한 경향을 나타냈다.
- (3) 실내모형실험과 수치해석을 비교 분석한 결과 막장 폐합비가 증가할수록 막장면 응력 및 지반 변위가 감소하는 것으로 나타났으며, 막장면에 슛크리트를 40%와 60% 폐합하였을 때 보다 막장면에 슛크리트를 80% 이상 폐합하였을 때 막장면에 작용하는 응력과 지반 변위가 감소하는 것으로 나타났다.

본 논문을 살펴본 바와 같이 암반지반이 아닌 사질토지반에서의 경제적 막장면 안정성 확보방안에 대한 연구로써 기존의 막장을 전면보강하는 공법이 아닌 막장

면을 부분적으로 폐합시켜 보강하는 방법이 경제성 확보에 용이하며 막장면 안정성 확보도 가능한 것으로 검토되었다. 또한 실제 터널 막장면에 대한 시공 및 계측이 이루어진다면 보다 실질적인 연구 성과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 기초과학연구지원사업 중 “신개념 고성능 터널지보 시스템 이론 및 지보재료 개발에 대한 연구”(과제번호 : 2011-0000511) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 국토해양부 (2009), 터널표준시방서, 한국터널공학회
2. 김상환, 민병헌 (2010), 터널 막장폐합비에 따른 지반 응력 및 침하량에 대한 연구, 한국터널공학회논문집, 제12권 제5호, pp.369-378.
3. 김상환, 정우진 (2010), 신개념 터널 막장폐합비에 따른 지반 변위에 대한 연구, 한국터널공학회 정기학술발표회, pp.199-204.
4. 김창용, 배규진, 문현구, 최용기 (1998), Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구, 한국암반공학회, 제8권, pp.209-225.
5. 변위용, 이승래 (2007), “대변형을 고려한 Flat DMT의 3차원 관입 해석”, 한국지반공학회논문집, 제23권 제1호, pp.67-76.
6. 유충식, 신현강 (2000), 수평보강재로 보강된 터널 막장의 거동, 한국터널공학회논문집, 제2권 제1호, pp.130-138.
7. 백두현 (2007), 산악지형터널이 붕락특성에 관한 연구, 상지대학교 석사학위논문.
8. 최용기 (2004), 굴진면 보강에 의한 토사터널의 중방향 아칭 효과, 건국대학교 박사학위논문
9. Atkinson, J. H. and Mair, R.J (1993). Soil mechanics aspects of soft ground tunnelling. *Ground Engineering*, Vol.14, No.5, pp. 20-26,38.
10. Broms, B. B. and Bennermark, H. (1967). “Stability of clays at vertical openings”. *ASCE, J.SMFD*, 99, SM1, pp.71-94.
11. Davis, E. H., Gunn, M.J., Mair, R.J. and Seneviratne, H.N. (1980). The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material. *Geotechnique* 30, No.4, pp.397-416.
12. Vermeer, P. A. and Ruse, N. (2001), “Die stabilitat der tunnelortsbrist im homogenen Baugrund”, *Geotechnik*, Vol.24, No.3, pp.186-193.
13. Uriel, A. O and Sagaseta, C. (1989), Selection of design parameters for underground construction. *Proc.of the 12th ICS MFE*, Rio de Janerio, Vol.4, pp.2521-2551.

(접수일자 2012. 1. 20, 심사완료일 2012. 4. 19)