

터널 막장폐합비에 따른 지반 응력 및 침하량에 대한 연구

김상환^{1*}, 민병현²

A study on stresses and displacements of the ground according to the closure ratio of tunnel face during tunnel excavation

Sang-Hwan Kim, Byeong-Heon Min

Abstract This paper presents a new approach of closing the tunnel face with sprayed concrete to reduce the stress at the tunnel face and displacement occurring at the ground surface during tunnel excavation. In order to carry out this research, the experimental and numerical studies are performed. In the experimental study, the model tests are carried out according to the closure ratio of tunnel face, tunnel depth and tunnel excavation length. The model test results are analyzed and interpreted by numerical calculation in order to verify both results obtained from experimental and numerical studies. It is clearly found that the tunnel face stability is decreased in decreasing the closure ratio of tunnel face. The results also show that the 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.

Keywords: Closure ratio of tunnel face, sprayed concrete, model test

요지 본 논문은 터널굴착 시 야기되는 지반의 응력과 지표면의 침하량을 감소시키기 위한 터널막장 폐합시키는 기법에 대한 연구이다. 이 연구를 수행하기 위하여 실내모형실험과 수치해석적 분석을 실시하였다. 실내모형실험에 있어서는 터널 막장의 폐합비, 터널깊이 그리고 터널굴착장에 따른 지반의 거동을 실험하였다. 이들 모형실험 결과를 검증하기 위하여 3차원 수치해석을 실시하였으며 서로의 결과들을 비교 분석하였다. 그 결과 막장 폐합비가 작아질수록 터널막장과 지반침하에 안정성은 저하되는 것으로 나타났으며 막장 폐합비가 80% 이상일 경우에는 막장 안정성에 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 이러한 연구결과는 향후 경제적인 터널막장폐합시스템을 개발하는데 매우 유용 할 것으로 기대된다.

주요어: 터널막장폐합비, 슛크리트, 모형실험

1. 서론

현대 사회의 급속한 발전으로 인해 도심지 광역화와 인구집중 등으로 도심지에 산업기반시설이 부족하여 지하공간의 활용이 날로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 지하공간의 대표적인 활용방안으로 터널이 많이 건설되고 있다. 터널 굴착공법 중 가장 많이 사용하고 있는 NATM공법은 지반이 원래 가지고 있던 지지력을 최대한 활용하여 지보재 등에 의해 터널을 안정화 시키는 공법이다. 그러나 연약한 지반이나 토사나 풍화가 심한 지형에 터널을 굴착할 경우 천단부의 붕락이나 막장면의 붕괴 우려가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 터널 보조공법의 선택이 중요하다. 터널 보조 공법중에서 막장면의 안정을 위한 막장면 슛크리트 공법은 팽창성

지반과 같은 연약한 지반에서 지반 붕락이 예상되기에 막장면에 슛크리트를 타설하여 막장면의 응력집중을 분산시키고 암반의 절리에 따른 이동을 방지하는 효과가 있다. 또한 장기간 굴착작업이 중단되는 경우에 막장의 강도 약화를 방지하기 위해서 적용한다(남기천 등, 2009).

터널 막장면 보조공법의 관한 국내연구는 터널 시공 시 수평보강재를 막장에 설치한 후 막장의 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구(유충식과 신강현, 1999)와 천단 및 막장면 수평보강에 의한 토사터널 보강효과 실험(권오엽 등, 2006), 막장볼트의 타설 형태에 따른 터널 막장 거동을 분석한 연구(김성열과 윤지선, 2009)가 있다. 또한 페이스 볼트공법을 이용한 터널 막장 보강공법에 관한 수치해석적 연구(라지현과 윤지선, 2007) 등이 있다. 이외에도 정량적인 막장 안정성 평가 기법을 이용한 NATM 터널의 보강공법 평가(김영수 등, 2008) 터널의 안정성 확보를 위한 보강공법의 연구가

¹정회원, 호서대학교 교수

²비회원, 호서대학교 교수

*교신저자: 김상환 (E-mail: kimsh@hoseo.edu)

최근에도 활발하게 이루어지고 있다. 국외연구로는 간단한 실내실험결과로부터 터널막장의 안정성에 대한 안정비를 제안하였으며(Broms and Bennermark, 1967) 이를 기초로 이후 추가적인 연구들이 다양하게 수행되었다.(Davis et al, 1980; Uriel and Sagaseta, 1989) 특히, 터널막장의 안정성에 대하여 기초의 지지력계수와 같이 무차원 터널안정계수를 제안하여 터널막장의 안정성 평가 방법을 제안하였다.(Atkinson and Mair, 1993) 그러나 이러한 연구들은 터널막장의 보강 유무에 따른 터널막장의 안정성 평가에 관한 연구들이며 경제적이고 실용적인 보조공법에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 연구가 미흡한 터널막장의 경제적인 보강방법에 대하여 기본적인 개념을 제시하고자 한다. 이 연구를 위하여 터널막장 폐합비에 따른 안정성에 대하여 터널굴진장과 토피고에 따른 변화를 모형실험을 통하여 실시하고, 이 결과의 검증에 위한 3차원 수치해석을 실시하였다.

2. 터널굴착에 따른 막장면의 안정성

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

그림 1은 터널 굴착시 막장의 파괴 형태를 유형별로

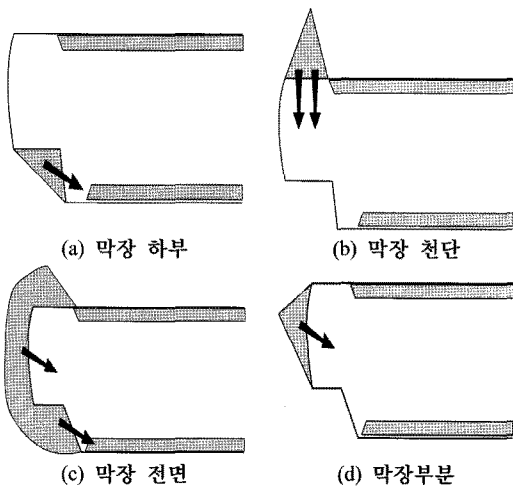


그림 1. 막장의 파괴유형

나열한 것으로 (a)는 상반 굴착 후 터널 하부의 구조적 결합에 의해 파괴되는 것을 나타내고 있다. (b)는 천단부에 형성된 절리에 의해 썩기형태 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 키블록이 형성되어 붕괴되는 형상을 나타낸 것이다.

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

이렇게 터널 막장 안정성에 영향을 주는 여러 요소가 있기에 지보압을 산정하여 지반의 안정성을 평가하는

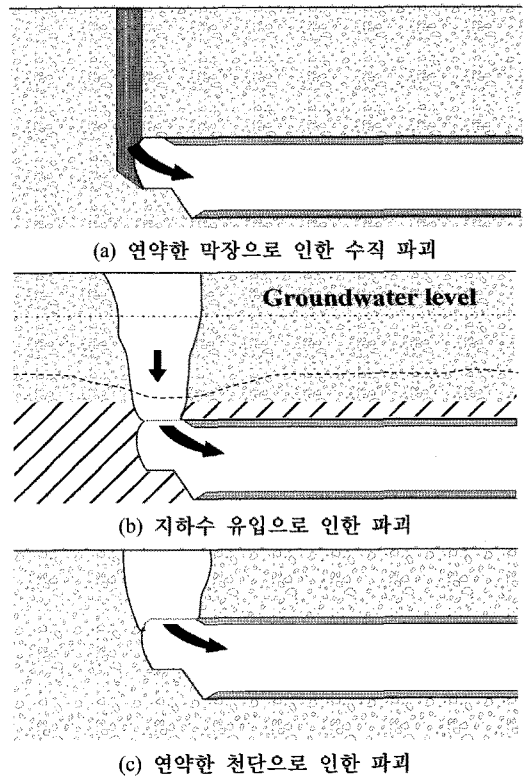


그림 2. 지표면의 파괴형태

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_0)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 식 (1)과 같이 막장면의 안전율(N)을 구할 수 있다.

$$N = \frac{q - P + \gamma(h + r_0)}{c} \quad (1)$$

여기서 γ : 단위중량, q : 수직하중,
 r_0 : 터널의 반지름, h : 토피고,
 c : 점착력, P : 지보압

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

이러한 막장면의 붕괴메카니즘 및 안정성에 대한 모형실험과 수치해석적 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있으나 이러한 연구들을 통해 경제적이면서 시공성이 우수한 막장면 보강공법에 대한 개발은 미흡한 실정이다. 따라서 상기 터널막장 안정성개념을 이용하여 경제적인 측면의 보강방법에 대하여 제시하면 막장의 부분적 보강, 즉 부분폐합방법을 고려해 볼 수 있다. 이러한 부분폐합에 대한 터널의 안정성을 규명하기 위한 실내 모형실험은 다음과 같다.

3. 실내모형실험

실내모형실험은 막장 폐합비와 토피고, 굴진장에 변화를 주어 막장면에 작용하는 수직응력과 지표면의 침하량을 측정하였다.

3.1 실험 장치 및 방법

실내모형실험에 사용한 실험장비는 막장면을 모사하기 위한 터널모형과 지반을 모사하기 위한 모형 토조가 사용되었으며 Load Cell과 LVDT센서를 이용하여 응력

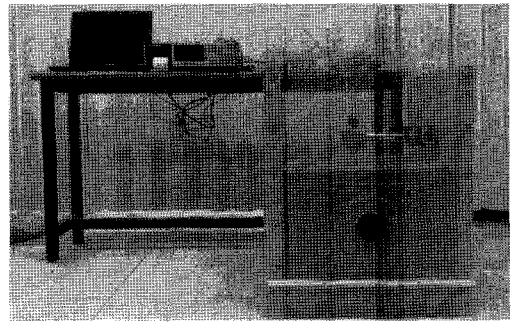


그림 3. 모형시험 토조 및 실험 장비

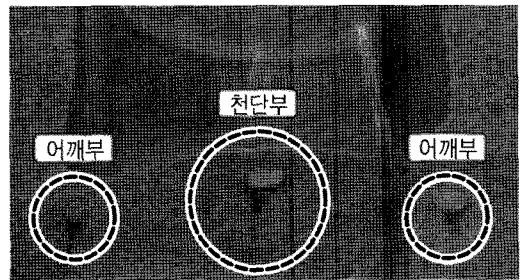


그림 4. Load Cell 위치

과 지표침하량을 측정하였다.

실험에 사용한 모형 토조는 그림 3과 같이 아크릴과 철판을 이용하여 가로, 세로, 높이 514×600×700(mm)로 제작하였다.

실내모형실험은 강사법에 의한 지반조성시 아크릴관을 매설하고 폐합비별 굴착면 개방을 실시하여 이때 발생하는 응력과 변위를 측정하였습니다. 천단에 작용하는 수직응력을 측정하기 위해 터널 천단부분과 양쪽 어깨 부분에 Load Cell을 설치하였고 지표침하를 확인하기 위해 조성된 지반위에 LVDT를 설치하여 실험을 하였다.

실험에 사용된 막장면 폐합비는 전면을 보강하는 기존의 막장면 슛크리트 보강공법이 아닌 안정성 확보는 가능하며 경제적인 최적 막장면 보강 폐합비를 선정하기 위하여 그림 5와 같이 폐합비를 선정하였다.

실험 조건은 표 1과 같이 막장 폐합비가 40%, 60%, 80%일 경우 토피고와 굴진장을 변화하며 적용하였다. 또한 신뢰성있는 데이터값을 구하기 위해 표 2와 같이 주문진 표준시를 이용하여 폐합비에 따라 강사법을 사용하여 균일한 모형지반을 조성하였다. 막장 폐합비 100%는 지표면의 침하량과 막장의 수직응력의 변화가 미미

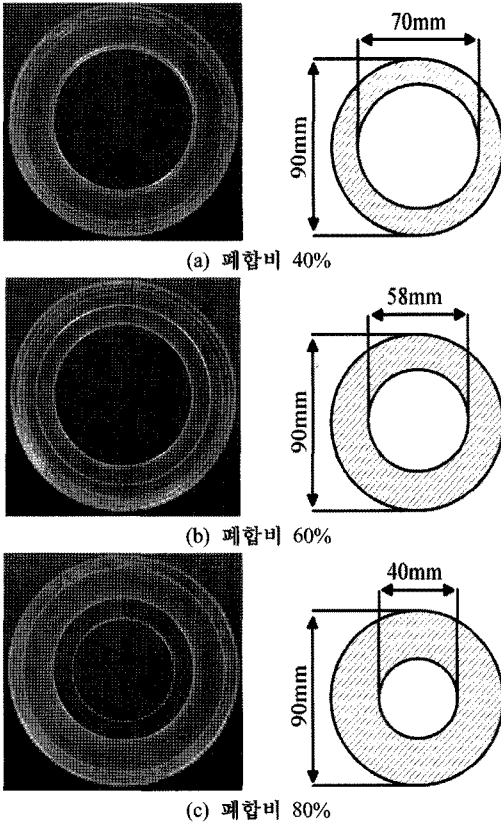


그림 5. 폐합비에 따른 터널 모형

표 1. 실험 Case

폐합비	40%, 60%, 80%
토피고 (D=터널직경)	1D, 2D, 3D
굴진장 (D=터널직경)	2D, 3D

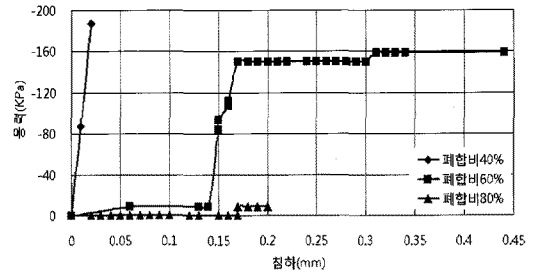
표 2. 표준사 기본 물성치

구분	적용 물성치
비중	2.67
함수비(%)	0.50
최대밀도(g/cm ³)	1.75

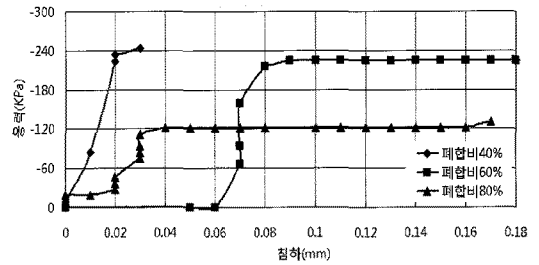
하여 본 실험에서 제외하였다.

3.2 실험 결과 분석

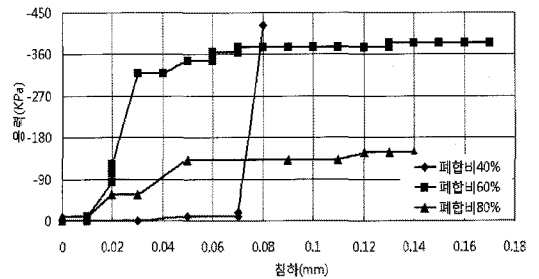
실내모형실험을 통해 막장 폐합비에 따른 지반에 거



(a) 토피고 1D



(b) 토피고 2D



(c) 토피고 3D

그림 6. 굴진장 2D의 응력-침하량 비교

동을 확인하기 위하여 막장면 천단에 작용하는 수직응력과 지표침하량을 토피고와 굴진장에 따라 비교해본 결과는 다음과 같다.

그림 6은 굴진장 2D에서 막장 폐합비와 토피고 변화에 따른 발생침하량에 대한 응력을 비교한 결과이다. 폐합비 40%에 토피고를 1D, 2D, 3D로 증가시킬 경우 그림 7과 같이 초기침하 발생 후 천단부에서 토사가 유입되며 상부지표가 함몰되었고 막장면 붕괴가 일어나 응력이 급격하게 증가하였다.

막장면 폐합비 60%와 80%의 경우에는 그림 8과 같이 토피고 증가에 따라 응력과 침하량이 점차 증가하였으며 폐합비가 80%일 경우 막장면의 응력과 변위가 가장 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 막장면의 폐합비

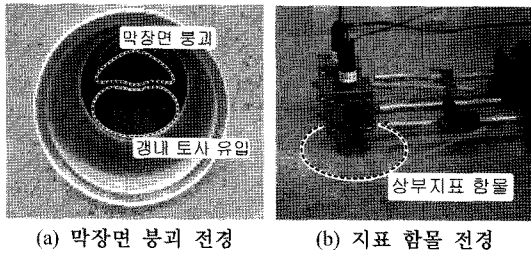
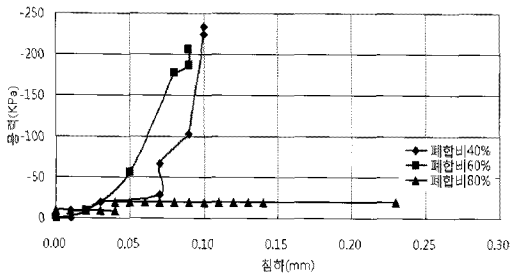
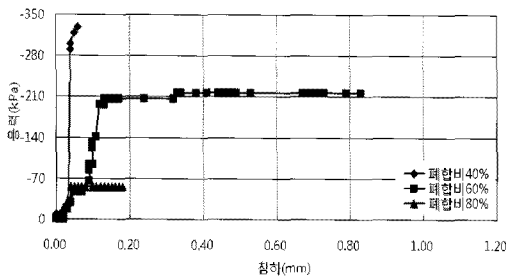


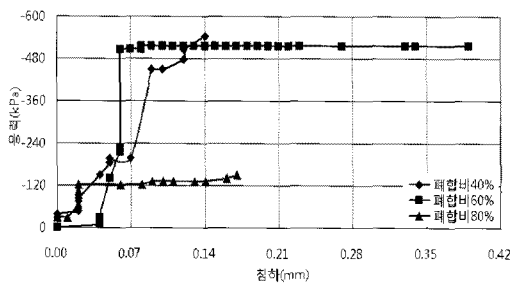
그림 7. 붕괴전경



(a) 토피고 1D



(b) 토피고 2D



(c) 토피고 3D

그림 8. 굴진장 3D의 응력-침하량 비교

가 터널의 안정성에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있으며 막장면의 폐합비를 80%이상으로 확보할 경우 안정성 확보가 유리한 것으로 판단된다.

그림 8은 굴진장이 3D일 경우 막장 폐합비와 토피고

표 3. 해석조건

적용모델		Mohr-Coulomb
토 압		$K_0=1.0$
적용 Case	폐합비	40%, 60%, 80%, 100%
	굴진장	2D, 3D
	토피고	1D, 2D, 3D

변화에 따른 발생침하량에 대한 응력을 비교한 결과이다. 막장 폐합비가 40%일 경우 굴진장 2D와 동일하게 초기응력이 급격하게 증가한 후 막장면 붕괴가 일어났다. 또한 막장 폐합비가 60%, 토피고 1D에서도 초기응력은 급격히 증가 한 후 막장면이 붕괴하였다.

막장 폐합비 60%에서 토피고를 2D, 3D로 증가시켰을 경우와 폐합비 80%에 토피고를 1D, 2D, 3D 증가시켰을 경우에는 응력과 침하량이 점차 증가하였으며 굴진장이 2D일 경우와 마찬가지로 폐합비가 80%일 경우 막장면의 응력과 변위가 가장 작게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 막장면의 폐합비가 터널의 안정성에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있으며 막장면의 폐합비를 80%이상으로 확보할 경우 굴진장이 증가하여도 터널의 안정성 확보가 유리한 것으로 판단된다.

4. 수치해석적 분석

본 연구에서는 실내모형실험결과에서 나타난 막장 폐합비에 따른 지반의 거동을 검증하기 위해서 Visual FEA를 이용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다.

4.1 해석 과정 및 방법

지반은 일반적으로 사용되고 있는 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb을 적용하였으며 실내모형실험과 동일한 조건의 수치해석을 실시하기 위하여 지반과 아크릴판의 마찰은 고려하지 않았으며 정지토압계수 $K_0=1.0$ 을 가정하였다(변위응 등, 2007). 해석조건은 표 3과 같이 Case 별 막장 폐합비와 굴진장, 토피고를 적용하여 막장면에 작용하는 수직 응력과 지표침하량을 측정하였다.

해석에 적용한 지반 물성치는 표 4와 같이 실내모형실험과 같은 사질토지반으로 가정하였으며 실내시험에 사용된 아크릴판을 대신하여 터널의 붕괴방지를 위하여 슛크리트를 적용하였다.

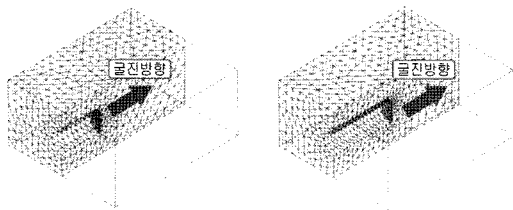
표 4. 적용지반 물성치

구분	사질토	연한 숫크리트	굳은 숫크리트
탄성계수 (kPa)	3.0×10^4	5.0×10^6	1.5×10^7
프아송비	0.25	0.2	0.2
단위중량 (kN/m ³)	19	24	24
점착력 (kPa)	15	-	-
내부 마찰각(°)	30	-	-
두께(m)	-	0.1	0.1

표 5. 경계조건

구분	수평영역	연직영역
철도설계기준 (노반편, 2004)	3.0B 이상	2.0H 이상
지반공학시리즈 (제7권, 터널)	3.0D	2.0D
도로설계요령	4.0D	3.0D
도로설계편람	3.0B 이상	2.0H 이상
적용	4.0D	2.0D

* B : 터널 굴착 폭, D : 터널 직경, H : 터널 높이



(a) 굴진장 2.0D의 종방향 단면 (b) 굴진장 3.0D의 종방향 단면

그림 9. 3차원 지반 모델링

숫크리트는 Shell요소를 사용하였으며 실내모형실험에 사용된 아크릴의 두께 1 mm에 대한 축소율을 고려하여 0.1 m로 적용하였다.

해석 모델링은 표 5의 설계기준을 참고하여 터널 굴착으로 인한 영향을 받지 않도록 가능한 넓은 영역인 측면으로 4D, 하부에서 2D 이격하였다.

터널의 직경은 9.0 m이고 그림 9의 (a)는 굴진장 2.0D 일 경우의 검토단면이고 (b)는 3.0D일 경우의 검토단면

표 6. 시공단계

구분	시공순서
1단계	지반초기화
2단계	굴착
3단계	연한 숫크리트 타설
4단계	굳은 숫크리트 타설

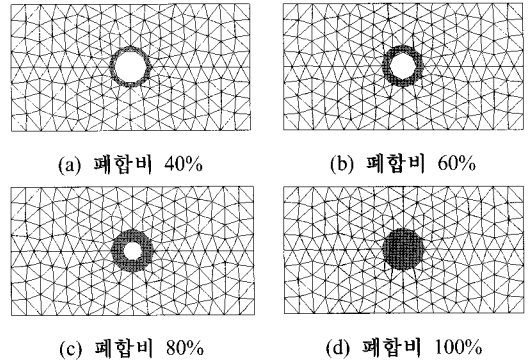


그림 10. 폐합비 변화에 따른 검토단면



그림 11. 측정위치

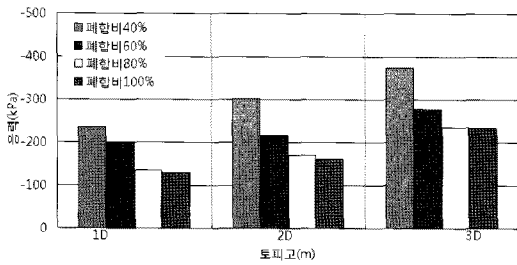
이다.

또한 수치해석은 실제 시공을 모사하기 위하여 표 6과 같이 시공단계를 모델링하였다.

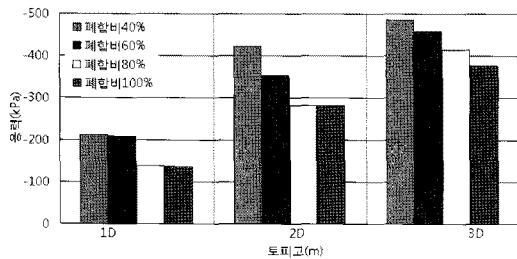
그림 10는 막장 폐합비에 따른 보강효과를 검토하기 위한 검토단면으로 폐합비를 40%, 60%, 80%로 모델링하였다. 또한 기존 막장보강 숫크리트공법과의 비교검토를 위하여 폐합비 100%에 대한 수치해석을 실시하였다.

4.2 수치해석 결과

수치해석결과에 대하여 실내실험과 동일한 위치에서의 최대 수직응력과 최대 침하량을 측정하였으며 측정 위치는 그림 11과 같다.



(a) 굴진장 2D



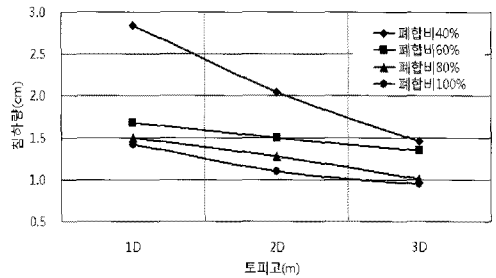
(b) 굴진장 3D

그림 12. 토피고의 변화에 따른 최대 수직응력

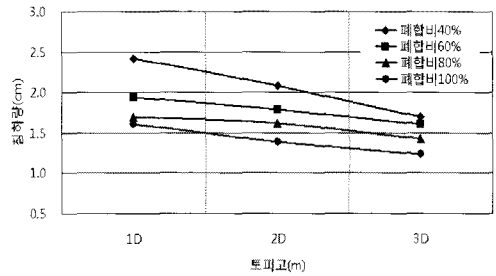
그림 12 (a)는 굴진장 2D에서 막장 폐합비와 토피고에 따른 최대 수직응력을 나타낸 것이다. 막장 폐합비 100%와 막장 폐합비 80%의 최대 응력이 토피고 1D, 2D, 3D에서 비슷한 경향을 보이고 있으며 토피고가 높을수록 수직응력이 증가하는 것으로 나타났다. 막장 폐합비 40%, 60%, 80%, 100%를 비교하였을 때 막장 폐합비가 작을수록 수직응력은 증가하는 것으로 나타났다.

그림 12 (b)는 굴진장 3D에서의 최대 수직응력을 나타낸 것이다. 굴진장 2D에서와 동일하게 토피고 1D, 2D에서는 막장 폐합비 100%와 막장 폐합비 80%가 비슷한 수직응력이 나타났다. 또한 막장 폐합비 40%의 토피고 1D, 2D, 3D에서 가장 높은 수직응력이 나타난 것을 확인하였으며 막장 폐합비 100%에서 가장 작은 수직응력이 측정되었다.

그림 13 (a)는 굴진장 2D에서 폐합비와 토피고에 따른 지표면 최대 지표 침하량을 나타낸 것이다. 막장 폐합비 40%의 토피고 1D에서는 최대 지표 침하량이 28.4 mm로 크게 일어났으며 막장 폐합비 100%에서 가장 적은 침하량이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 막장 폐합비 80%와 막장 폐합비 100%의 최대 침하량을 비교하였을 때 막장폐합비 80%에서 근소하게 침하량이 증가하



(a) 굴진장 2D



(b) 굴진장 3D

그림 13. 토피고의 변화에 따른 최대 침하량

여 나타난 것을 확인할 수 있었다. 그림 13 (b)는 굴진장 2D에서 막장 폐합비와 토피고에 따른 지표면 최대 지표 침하량을 나타낸 것이다. 막장 폐합비 100%의 토피고 3D에서 가장 작은 침하가 일어났으며 막장 폐합비 40%에 토피고 1D에서 가장 많은 침하가 일어난 것으로 보아 막장 폐합비와 토피고가 낮을수록 지표면 침하량이 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다.

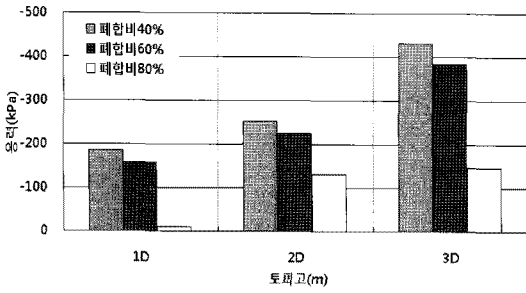
5. 최대 수직응력과 최대 침하량 비교

실내모형실험과 수치해석의 결과를 통해 막장면의 최대 수직응력과 최대 침하량을 측정하여 비교해 보았다.

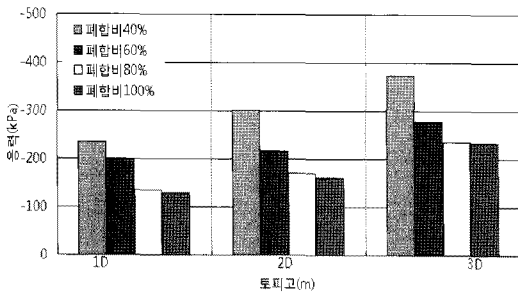
5.1 막장면 최대 수직응력 비교

실내모형실험의 결과와 수치해석에서 나타난 막장면의 최대 수직응력을 비교·분석한 결과는 다음과 같다. 그림 14는 굴진장이 2D일 경우 막장 폐합비와 토피고에 따른 실내모형실험과 수치해석의 발생 최대 수직응력이다.

(a)와 (b)를 비교 분석해 본 결과 막장 폐합비 40%에

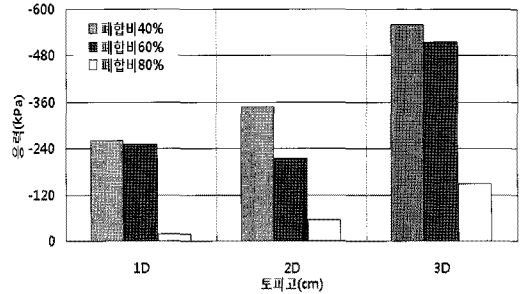


(a) 실험 최대 수직응력

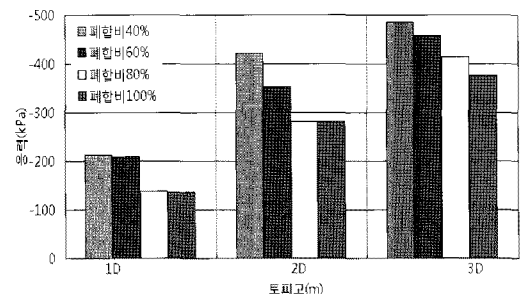


(b) 수치해석 최대 수직응력

그림 14. 굴진장 2D의 최대 수직응력 비교



(a) 실험 최대 수직응력



(b) 수치해석 최대 수직응력

그림 15. 굴진장 3D의 최대 수직응력 비교

서 최대수직응력 431.0 kPa과 375.0 kPa이 발생하였고 폐합비가 증가함에 따라 응력이 감소하는 경향을 보였다. 하지만 수치해석을 통한 검토결과 막장 폐합비 100%의 경우 최대 수직응력은 234.0 kPa로 폐합비 80%의 235.0 kPa과 큰차이를 보이지 않았다.

그림 15의 (a), (b)는 막장 폐합비와 토피고에 따른 굴진장 3D의 실내모형실험과 수치해석의 발생 최대 수직응력의 결과이다.

(a)와 (b)를 비교 분석해 본 결과 굴진장 2D의 결과와 마찬가지로 폐합비 40%에서 최대수직응력 562.0 kPa과 485.0 kPa이 발생하였고 폐합비가 증가함에 따라 응력이 감소하는 경향을 보였다. 하지만 수치해석을 통한 검토결과 막장 폐합비 100%의 경우 최대 수직응력은 376.0 kPa로 폐합비 80%의 414.0 kPa과 큰차이를 보이지 않았다. 이는 폐합비 80%이상에서는 막장면에 작용하는 수직응력의 변화는 크지 않을 것으로 판단되어진다.

5.2 최대 침하량 비교

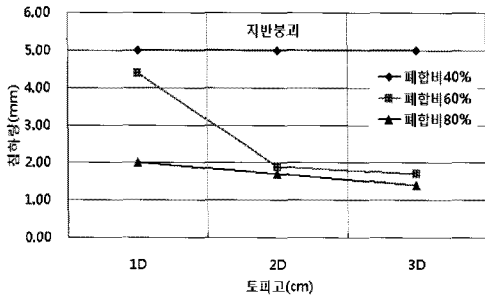
실내모형실험에서 나타난 최대 지표면의 침하량과 수치해석에서 측정된 최대 지표면의 침하량을 비교·분석한

결과 다음과 같이 나타났다. 이때 분석결과는 수치해석의 경우 실제지반을 모사한 것이고 실내모형실험의 경우 1/10축소율을 적용한 것이다.

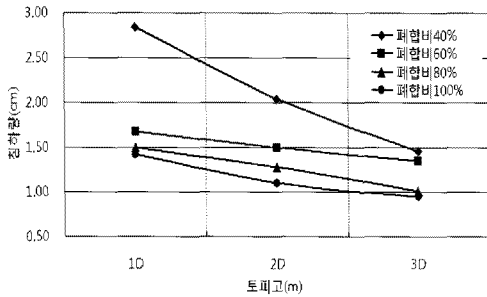
그림 16의 (a), (b)는 굴진장 2D에서 막장 폐합비와 토피고에 따른 실험과 수치해석의 최대 지표면 침하량을 비교한 결과이다.

(a)와 (b)를 비교한 결과 막장 폐합비 40%의 실험에서는 모두 막장면 붕괴가 일어났으며 수치해석결과 최대 침하량은 28.4 mm 발생하였다. 폐합비와 토피고가 증가함에 따라 지표면의 침하량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 토사 NATM터널의 굴착안정성에 관한 해석적 고찰(이재성, 2008)에서와 같이 사질토지반의 경우 토피고가 높아질수록 침하량이 감소하는 것을 나타내고 있다. 수치해석을 통한 검토결과 막장 폐합비 100%의 경우 최대침하량은 14.2 mm로 가장 작은 것으로 나타났으나 막장 폐합비 80%의 15.0 mm와 큰차이를 보이지 않았다

그림 17의 (a), (b)는 굴진장 3D에서 막장 폐합비와 토피고에 따른 실험과 수치해석의 최대 지표면 침하량을 비교한 결과이다.

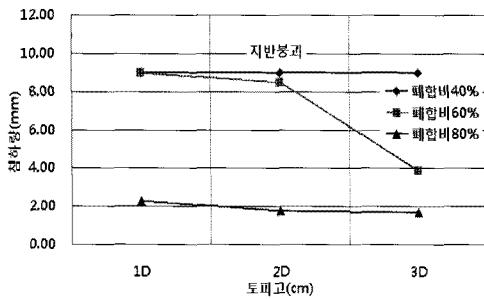


(a) 실험 최대 침하량

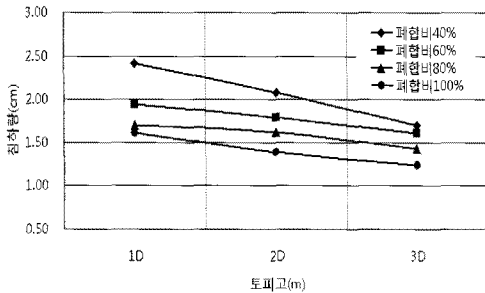


(b) 수치해석 최대 침하량

그림 16. 굴진장 2D의 최대 침하량 비교



(a) 실험 최대 침하량



(b) 수치해석 최대 침하량

그림 17. 굴진장 3D의 최대 침하량 비교

(a)와 (b)를 비교분석한 결과 막장 폐합비 40%의 실험에서는 모두 막장면 붕괴가 일어났으며 수치해석결과 최대침하량은 24.2 mm 발생하였다. 막장 폐합비 60%에 대한 실험결과는 토피고 1D의 경우에는 막장면 붕괴가 발생하였지만 2D와 3D의 경우에는 굴진장 2D와 마찬가지로 폐합비와 토피고가 증가함에 따라 지표면의 침하량이 감소하는 것으로 나타났다. 굴진장 3D의 경우 수치해석을 통한 검토결과 막장 폐합비 100%의 경우 최대침하량은 16.1 mm로 가장 작은 것으로 나타났으나 폐합비 80%의 17.0 mm와 큰차이를 보이지 않았다. 실내시험과 수치해석을 통한 비교분석결과 폐합비 80% 이상일 경우 침하영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 막장 폐합공법에서 경제적이고 실용적인 막장 폐합비를 찾기 위해 시행되었다. 축소모형실험과 수치해석을 통하여 막장 폐합비와 토피고, 굴진장을 변화시켜 실험한 결과 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 막장 폐합비 40%를 적용한 실내모형실험에서는 토피고 1D, 2D, 3D에서 모두 파괴가 나타났으며 수치해석에서는 가장 높은 수직 응력과 지표침하량이 나타났다. 또한 폐합비 80%에서는 실험과 수치해석에서 막장면의 수직응력과 지표침하가 감소하는 것으로 나타났다.
2. 막장 폐합비 80~100%까지는 지반 변위가 미미하게 발생하는 것으로 나타났으며 80% 미만의 폐합비에서는 지표침하가 크게 발생하는 것으로 나타났다.
3. 막장 폐합비 별로 토피고와 굴진장을 비교한 결과 토피고가 높을수록 수직 응력은 증가하는 것으로 나타났으며 지표침하는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 굴진장 별로 비교해본 결과 굴진장 2D에 비해 굴진장 3D에서 수직 응력과 지표침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구결과 기존의 막장을 전면보강하는 공법이 아닌 막장면의 80% 이상을 부분적으로 폐합시켜 보강하는 방법으로 막장면 안정성 확보가 가능할 것으로 판단된다. 또한 토피고와 굴진장에 따른 막장 폐합비를 적절

하게 적용함으로써 터널굴착시 시공성 및 경제성 확보가 가능할 것으로 판단되어진다. 본 연구는 막장폐합비를 40, 60, 80%로 가정하여 실내모형실험과 수치해석 검증을 통한 연구결과이므로 추후 보다 세부적인 실내 실험과 수치해석 검증과정이 이루어지고 현장실험 및 실제 터널 막장면에 대한 시공 및 계측이 이루어진다면 보다 실질적인 연구 성과를 얻을 수 있을 것이라 판단되어진다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 “신개념 고성능 터널지보 시스템 이론 및 지보재료 개발에 대한 연구”(과제번호 : 2010-0000251) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 권오엽, 신종호, 최용기, 이상백(2006), “천단 및 막장면 수평보강에 의한 토사터널 보강효과-실대형실험”, 한국지반공학회 논문집, 제22권, 제6호, pp. 71~82.
2. 김성열, 윤지선(2009), “터널막장안정 평가기법 및 막장 볼트의 보강효과에 관한 수치해석적 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제1호, pp. 11~22.
3. 김영수, 이재호, 문홍득, 김광일(2008), “정량적인 막장 안정성 평가기법을 이용한 NATM 터널의 보강공법 평가”, 한국지반공학회지, Vol. 24, No. 2, pp. 35~45.
4. 남기천, 김유성, 김치환, 유광호, 김상환, 강보순, 김종민, 최준성(2009), “현장 실무를 위한 토목시공학”, 한솔 아카데미 출판사.
5. 라지현, 윤지선(2007), “페이스 볼트공법을 이용한 터널 막장 안정성에 관한 수치해석적 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 83~89.
6. 변위용, 이승래(2007), “대변형을 고려한 Flat DMT의 3차원 관입해석”, 한국지반공학회논문집, 제23권, 제1호, pp. 67~76
7. 백두현(2007), “산악지형터널이 붕락특성에 관한 연구”, 상지대학교 석사학위논문.
8. 유충식, 신현강(1999), “터널 막장의 안정성 평가 및 수평보강재를 이용한 보강공법”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 2, pp. 529~532.
9. 이재성(2008), “토사 NATM터널의 굴착 안정성에 관한 해석적 고찰”, 중앙대학교, 석사학위논문
10. 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.
11. Broms, B.B. and Bennermark, H.(1967). “Stability of clays at vertical openings”. *ASCE, J.SMFD*, 99, SM1, pp. 71~94.
12. 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.
13. Vermeer, P.A. and Ruse, N.(2001), “Die stabilitat der tunnelortsbrist im homogenen Baugrund”, *Geotechnik*, Vol. 24, No. 3, pp. 186~193.
14. 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.

접수일(2010.8.31), 수정일(2010.9.10), 게재확정일(2010.9.25)