

편경사지에 굴착한 반개착식 천층터널에서 아치슬래브의 거동

양재원^{1*}, 이상덕²

Behavior of arch slab in the shallow tunnel constructed perpendicular to slope by semi-cut-and-cover method

Jae-Won Yang, Sang-Duk Lee

Abstract Recently, the number of shallow tunnel construction increases to improve the structural safety and environment-friendliness. In semi-cut-and-cover Method, ground is excavated to the crown arch level and arch slab is set to backfill before the excavation of lower face. In this study, laboratory model tests was performed to clarify the behavior of the arch slab constructed perpendicular to the slope. Results show that Arch slab is affected by perpendicular to the slope and bedrocks. Negative moment at the upper part of the arch slab at hillside and positive moment at the upper part at the other side are generated as perpendicular to the slope increases. Reaction load at the hillside support was larger than that at the other side.

Keywords: Semi-cut-and-cover Method, arch slab, perpendicular to the slope, model test

요 지 최근 아치슬래브를 이용한 새로운 반개착식 터널공법이 터널안정성 확보와 건설비용 감소, 환경훼손 최소화를 위해 적용되고 있다. 반개착식 공법은 원지반을 터널 천단아치부 까지만 굴착하고 아치형 구조물을 설치하여 복토한 후에 터널하반을 굴착하는 공법이다. 본 논문에서는 편경사 지역에서 반개착식으로 굴착 할 경우 편경사에 따른 아치슬래브의 거동을 실내모형실험으로 규명하였다. 연구결과, 아치슬래브의 거동은 원지반의 편경사 크기, 굴착심도, 굴착사면의 경사 및 기반암의 위치에 영향을 받는 것으로 나타났다. 아치슬래브의 축력은 전반적으로 압축력이 지배하나 편경사가 커질수록, 저지대에서 부분적으로 인장력이 발생하였다. 아치슬래브의 모멘트는 편경사가 증가할수록 고지대에서는 압축모멘트가 발생하며, 저지대에서는 인장모멘트가 발생하였다. 지점반력은 편경사가 커질수록 고지대에서는 증가하며, 저지대에서는 감소하여 좌우편차가 발생하였다.

주요어: 반개착식 공법, 아치슬래브, 편경사, 실내모형실험

1. 서 론

최근 친환경적인 건설문화에 대한 관심의 증가와 심각하게 대두되는 도심지의 교통난 해결 및 도로나 철도의 주행성 향상을 위하여 터널에 대한 수요가 늘어나고 있는 실정이다. 이에 따라 터널의 갱구부 등과 같이 토피가 낮은 구간에 대하여 시공성과 구조적 안정성은 물론 자연친화적인 개념의 도입이 요구되고 있다(안정환과 이상덕, 2009). 국내 신약터널의 경우, 대절토로 인한 환경훼손 최소화와 갱구사면의 안정성 확보를 위하여 토피고 5m 내외의 구간에 갱구위치를 계획하도록 권고하고 있어 저토피 구간에 터널갱구부가 위치하는 경우가 빈번히 발생되고 있다. 터널 토피고가 1.0D이하인

저토피구간은 지반의 아칭효과를 기대할 수 없어 NATM 원리가 적용될 수 없으므로 보조공법을 적용하여 보강하고 있으나 터널안정성을 확신할 수 없고 공사비가 과다로 소요되는 문제가 있다(양문상과 이상덕, 2000). 또한, 도심지 터널공사 등에서 빈번히 발생하는 토피고 1.0D 이하의 천층터널의 경우 대부분 원지반을 터널계획고까지 굴착하고 개착구조물을 시공한 후 복토하는 시공방식을 채택하고 있다. 최근 아치형 개착식 터널 시공시에 현장타설을 하지 않고, 현장주변이나 공장에서 프리캐스트 부재를 제작하여 현장에서 간단하게 조립 및 설치하는 프리캐스트 아치형 개착식 터널이 증가하고 있다(황재홍, 2009). 그러나 이러한 개착식 터널 시공시에 지반을 과다취철하고 시공과정 중에 도로를 점유하여 교통난을 유발하는 등, 여러 문제점이 있는 실정이다. 이에, 선진 외국에서는 터널 갱구부 및 도심지

¹정회원, ㈜도담이앤씨 지반터널부 부장

²정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

*교신저자: 양재원 (E-mail: udecflac@dodamenc.co.kr)

터널공사 등의 천층터널에 srch slab를 이용한 굴착공법을 적용하여 구조적인 안정성과 자연친화성을 높이고 있다. arch slab를 이용한 굴착공법은 반개착식 공법의 일종이며, 저토피구간에서 원지반을 터널 천단아치에 해당하는 지점까지만 굴착하고 arch slab를 설치하여 복토한 후에 터널하반을 굴착하는 공법으로 기존 개착공법에서 발생하는 대절토 사면 발생과 굴착면 보강에 따른 고비용, 불안정성 증대 및 공사 중 교통난 등을 해결할 수 있다. 그러나, arch slab를 이용한 굴착공법은 국내에 덜 알려져 있으며, 공학적 거동특성도 완전히 규명되지 않아 실제 토목기술자들이 그 적용여부를 두고 망설이고 있는 실정이다. 현재 국내의 기술진에 의하여 이 공법의 거동을 규명하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 본 연구에서는 Arch Slab에 편토압이 작용할 경우의 거동특성을 실내모형실험으로 규명하고자 한다.

2. Arch slab를 이용한 반개착식 굴착공법

반개착식의 일종인 arch slab공법은 산악터널의 갱구부와 계곡부, 도심지 지하철과 같은 천층터널에서 시공되는 기존 개착공법의 문제점을 보완하기 위해 제안된 반개착 방식의 터널공법이다. arch slab를 이용한 공법은 비교적 균일한 상재하중을 아치형의 구조로 지반에 직접 전달하며, 구조적으로 압축력을 주로 받는 구조물이므로 휨에 대해 안정적이고 경제적인 단면설계가 가능하다. 또한, 균일한 하중에 유리한 아치형 단면으로서 압축력에 유효한 만큼의 최소단면 소요로 경제성이 높고 갱구부 노출면의 곡선화에 의한 자연과의 조화성 및 시각적 개방감이 우수한 장점이 있다.

Arch slab를 이용한 공법의 시공순서는 그림 1과 같다. 원지반을 터널 천단아치부에 해당하는 부분까지 굴착하고, 조성된 지면위에 아치형 구조물을 설치한다. 아치형 구조물의 시공이 완료된 후에는 상부의 굴착공간을 되메움하면서 동시에 터널 하반을 굴착한다.

그림 2와 같이 완전개착식 공법에 비해 원지반을 터널 천단아치부에 해당하는 부분까지만 굴착하기 때문에 토사를 굴착하고 되메움하는 과정에서 토공량을 대폭 감소시킬 수 있으며, 상·하반 동시시공으로 공사기간을 단축시켜 상부 구조물의 복구가 신속하게 이루어지므로 도심지의 경우 교통 혼잡을 줄일 수 있다. 또한 사면의 규모가

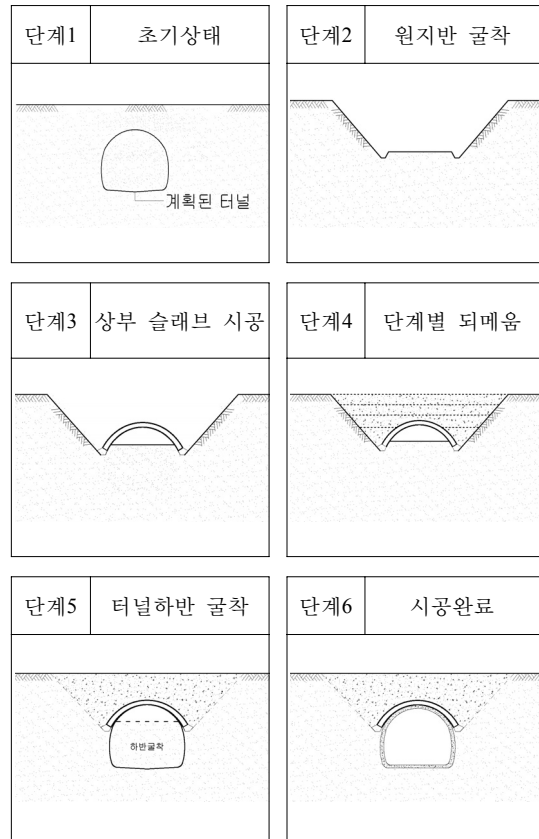


그림 1. Arch slab를 이용한 반개착식 굴착공법의 시공순서

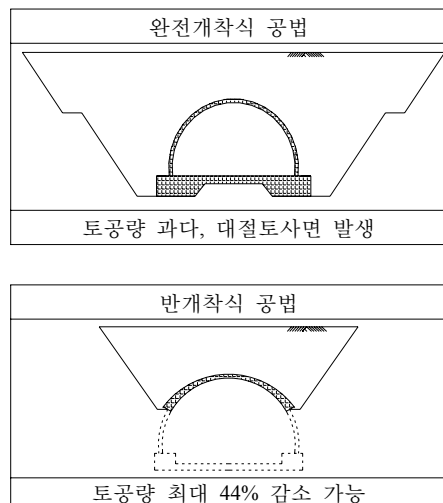


그림 2. 반개착식 공법의 토공감소 효과

작아지고 급경사면을 유지시키지 않는 구조이기 때문에 절토사면 붕괴의 위험을 배제시킬 수 있게 되어 절토사면의 유지관리가 용이하며 비용경감 등의 장점이 있다.

3. 실내모형실험

3.1 연구내용 및 방법

Arch slab를 이용한 반개착식 굴착공법은 원지반을 슬래브가 설치될 위치까지만 굴착하고 슬래브를 설치한 후 되메움을 하여 NATM공법으로 터널을 굴착하는데, 시공과정에서 slab와 지점부 및 굴착사면의 안정성을 확보해야 한다. 이는 원지반과 아치구조체 사이의 기하학적인 관계 즉, 굴착사면 경사, 되메움토 높이, 지점조건 및 되메움토의 경사 등과 밀접한 관련이 있다.

본 연구는 편경사지에 arch slab를 이용한 반개착식 공법이 적용될 경우, 아치슬래브와 지점부의 거동을 실내모형실험으로 분석하였다. 주된 변수로는 원지반의 편경사, 굴착사면 경사, 되메움 높이, 기반암 위치 등으로 설정하였다. 원지반의 편경사와 굴착사면의 경사는 모형지반의 전단강도를 고려하여 0°, 15°, 30°로 계획하였으며, 되메움 높이는 최대 1.5D(D:아치슬래브의 직경)이다. 또한, 기반암의 위치가 슬래브에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기반암선이 Arch Slab의 한쪽지점 하부를 통과하는 경우와 Slab천단에 접하여 통과하는 조건으로 나누어서 연구를 수행하였다. 이와 같이 선정된 실험변수들은 그림 3과 같으며 실험명은 변수조건에 따라 다음과 같이 설정하였다.

기반암 위치조건을 H, 굴착사면 경사를 S, 되메움토

경사를 F로 설정하였다. 예를들어, 실험명이 H1S15F30인 경우는 기반암선이 한쪽 지점하부를 통과할 경우이며 굴착사면 경사가 15°이고 원지반 편경사가 30°인 경우이다. 실내모형실험의 계측은 되메움 높이 0.25D 마다 수행하였다.

3.2 실내모형실험

3.2.1 모형토조

그림 4와 같이 본 연구에 적용된 모형토조는 (폭)30 cm×(길이)120 cm×(높이)100 cm의 제원을 가지고 있으며, 토조 프레임은 L형강과 C형강으로 제작되어 있다.

토조벽은 투명 아크릴판과 유리의 2중으로 제작되어 있어 변형과 마찰을 최소화 할 수 있고 네 개의 지점변위 장치가 실험기의 전면과 후면의 좌우에 배치되어 있다.

3.2.2 아치슬래브

아치슬래브는 원형터널의 상부아치에 해당하는 형상을 철판을 절곡하지 않고 재료가 변질되지 않는 장점이 있는 steel pipe를 이용하여 제작하였다. 또한, 슬래브 부재의 두께는 지반과의 강성비를 고려하여 두께 1mm, 직경 180mm로 제작하였다(그림 5).

3.2.3 지점하중 측정장치

아치슬래브 지점부의 수직, 수평방향 반력을 측정하기 위하여 그림 6과 같이 각 지점에 load cell을 수직과 수평방향으로 설치하여 하중을 측정할 수 있는 구조로 제

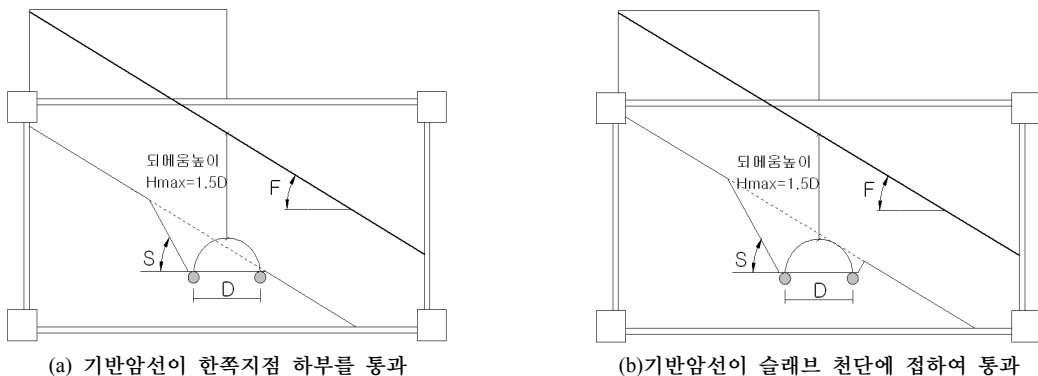


그림 3. 모형실험 방법

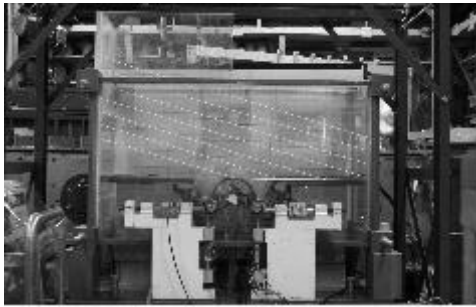


그림 4. 모형토조 외관.



그림 5. 모형 아치슬래브

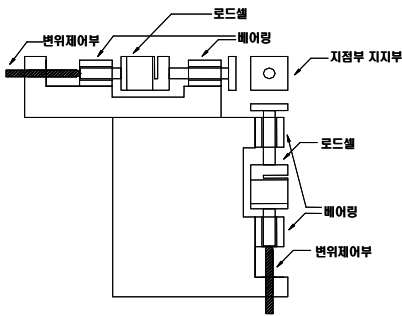


그림 6. 지점하중 측정장치

작하였다.

3.2.4 모형지반

본 실험에서 모형지반은 입경이 0.42~1.70 mm인 주문진 자연사를 이용하여 조성하였으며 심도별로 균질하게 조성되도록 샌드커튼(Sand Curtain) 방식의 강사기를 이용하였다. 모형지반의 물리적 특성 및 역학적 특성을 파악하기 위하여 입도분포시험(KS F 2301), 최대·최소 건조단위중량시험(DIN 18126), 비중시험(KS F 2343)

표 1. 모형지반의 물리적 시험 결과

물리적 특성	결 과
입도분포	D10 = 0.46 Cu = 1.72 Cc = 0.93
최대·최소 건조단위중량	$\gamma_{dmax} = 17.5\text{kN/m}^3$, $\gamma_{dmin} = 14.3\text{kN/m}^3$
비 중	Gs = 2.61
USCS	SP

표 2. 모형지반의 역학적 시험 결과

역학적 특성	결 과
상대밀도 D_r [%]	74.0
내부마찰각 ϕ [°]	37
점착력 c [kN/m^2]	0

및 직접전단시험(KS F 2348)을 수행하였으며 모형지반의 물리·역학적 특성은 표 1과 표 2와 같다.

3.2.5 계측

베이클라이트판으로 제작한 굴착사면을 모형토조안에 설치하고, 지점하중 측정장치를 셋팅한 후 네 지점의 지점하중 측정장치에 아치형 강재슬래브를 설치하였다.

각 지점부는 현장상황을 고려하여 한지조건으로 설정하였고, 강사장치를 이용하여 모형지반을 균질하게 조성하였다. 모형지반은 0.25D(D:아치슬래브 직경)마다 조성하였으며 하중지반이 안정화 된 후 계측을 수행하였다.

아치형 슬래브에 작용하는 단면력은 스트레인게이지를 통하여 측정하였다. 측정위치는 그림 7(a)와 같이 천단부로부터 양쪽으로 30° 간격으로 내부와 외부에 7개소를 설치하여 단면에 작용하는 축력 및 모멘트를 측정하였다.

뒤메움토의 편경사에 의한 아치슬래브의 내공변위 경향을 분석하기 위하여 그림 7(b)와 같이 LVDT를 45° 간격으로 5개소에 설치하였다. 지점반력과 작용방향을 분석하기 위하여 슬래브강재 지점부에 로드셀을 수직방향과 수평방향으로 설치하였다(그림 7.c).

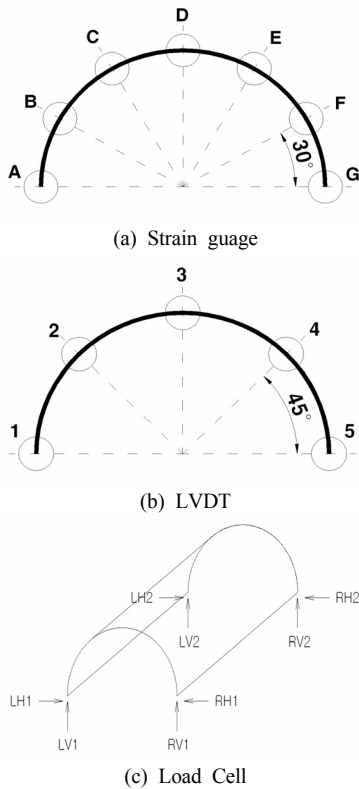


그림 7. 측측위치

3.2.6 실험방법

본 연구는 실험의 정확성을 유지하고, 연구 성과의 제고를 위하여 다음의 순서에 따라 수행하였다.

- ① 지점변위 제어장치를 고정시키고 굴착 사면 경사를 조정된 후 지점과 슬래브를 소정 위치에 설치하여 실험기기를 Setting한다(그림 8(step 1)).
- ② 강사레일을 설치한 후 강사기를 이용하여 샌드커튼 방식(Sand Curtain)으로 균질하게 모형지반을 조성한다(그림 8(step 2)).
- ③ 성토고를 0.25D씩 6단계로 최대 1.5D까지(0.25D, 0.50D, 0.75D, 1.0D, 1.25D 및 1.5D) 조성한 후, 하중지반이 안정화되는 때에 슬래브에 설치한 스트레인게이지, LVDT와 지점부 Load Cell의 Data를 각 단계에 대하여 측정한다(그림 8(step 3, 4)).
- ④ ②,③의 과정을 반복한다.

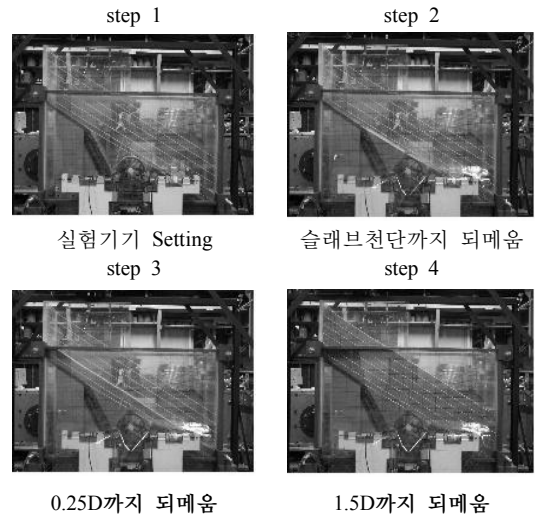


그림 8. 실험수행 과정

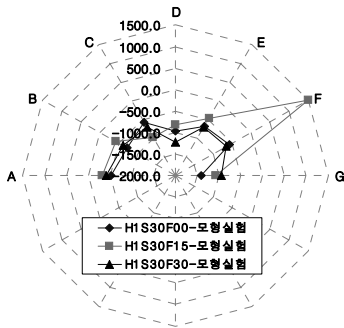
4. 실험결과

4.1 아치슬래브의 축력

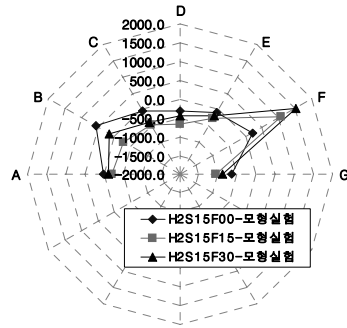
그림 9는 편경사에 따른 축력경향을 나타내고 있다. 편경사가 0°인 경우, 즉 상부 원지형이 수평인 경우는 압축력(-)의 지배를 받으나 편경사가 커질수록 저지대쪽 상부(E, F점)에서 부분적으로 인장력이 발생하였다. 이와 같은 결과는 편경사와 되메움고가 증가하면서 좌측에서 우측으로 편압이 작용함에 따라 좌측(고지대)에는 압축력이, 우측(저지대)에서는 인장력이 나타난 것으로 사료된다. 또한, 저지대쪽 상부에 인장력이 발생하는 경향은 기반암이 위치가 깊어질수록 더 뚜렷해졌다.

4.2 아치슬래브의 모멘트

아치슬래브의 모멘트도 전반적으로 압축모멘트의 지배를 받으나 편경사가 커질수록 고지대쪽 상부(C점)는 압축모멘트가 커지며, 저지대쪽 상부(F점)는 인장모멘트가 발생하였다. 그림 10은 편경사에 따른 모멘트 경향에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 슬래브 상부의 되메움고가 높아질수록 압축모멘트 및 인장모멘트의 값은 증가하였으나, 모멘트 증가율은 편경사, 굴착사면 경사, 되메움고 등에 의해 일정한 경향을 나타내지는 않았다. 다만, 아치슬래브 시공을 위한 굴착사면의 경사가 완만하여 질수록 편경사에 의한 모멘트 변화율이 크게 관찰

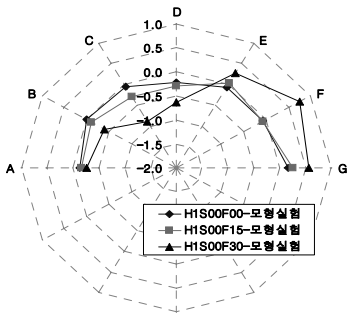


(a) 기반암이 한쪽 지점하부를 통과(H1)

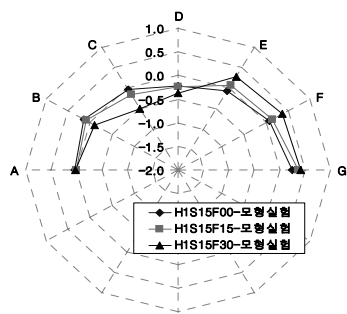


(b) 기반암이 슬래브 천단을 통과(H2)

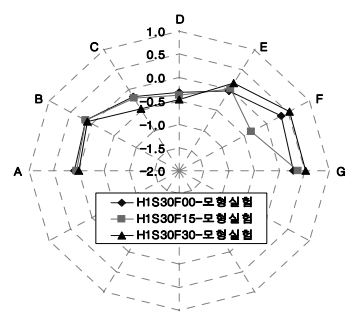
그림 9. 편경사에 따른 축력경향(단위: N)



(a) 굴착사면 경사가 0°일 경우

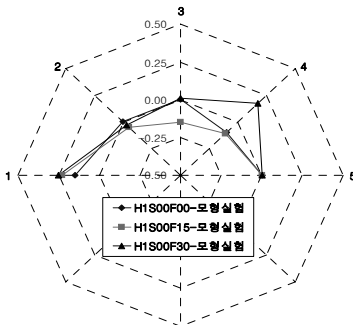


(b) 굴착사면 경사가 15°일 경우

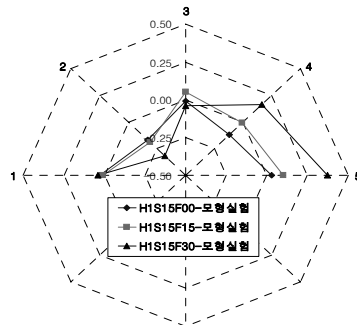


(c) 굴착사면 경사가 30°일 경우

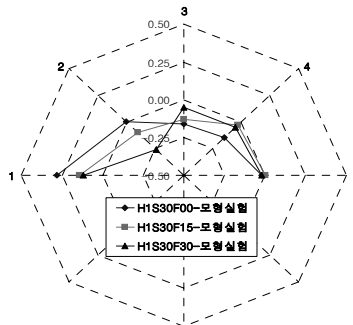
그림 10. 편경사에 따른 모멘트 경향(단위: N)



(a) 굴착사면 경사가 0°일 경우



(b) 굴착사면 경사가 15°일 경우



(c) 굴착사면 경사가 30°일 경우

그림 11. 편경사 및 굴착사면 경사에 따른 내공변위 경향(단위: mm)

되었다. 이 결과로부터 굴착사면 경사가 급하여 질수록 상부 되메움 하중을 부담하는 아칭현상이 커진다는 것을 알 수 있었다.

4.3 아치슬래브의 내공변위

그림 11은 편경사 및 굴착사면 경사에 따른 내공변위

경향을 나타낸 것으로 상부 원지형이 수평일 경우, 내공 변위는 내측(-)방향으로 발생하며 천단부에서 가장 크게 발생하였다. 편경사가 커질수록 고지대에서 내측(-)방향으로 변위가 증가하며, 증가율은 굴착사면 경사가 완만하여 질수록 증가하였다. 또한, 동일한 조건에서 기반암 선이 낮아질 수록 내공변위 증가율이 증가하였다

저지대의 경우, 편경사가 커질수록 내공변위는 감소하거나 슬래브 외측(+)방향으로 변위가 발생하였다. 이러한 경향은 굴착사면 경사가 완만할수록 더 잘 나타났으며, 기반압선이 낮아질수록 외측방향으로 변위발생율이 높았다.

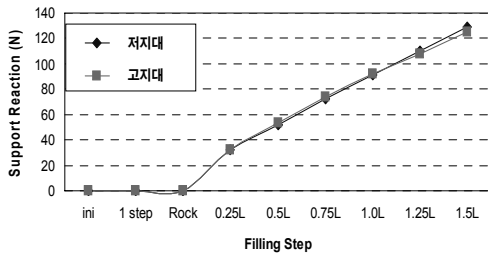
4.4 지점반력

아치슬래브의 지점부 반력은 되메움고가 증가할수록 커지며, 굴착경사가 완만하고 기반압선의 낮아질수록 크게 나타났다. 굴착사면 경사가 급해질수록 반력값이 작아지는 경향은 굴착사면이 상부 되메움고의 하중을 일부 지지하였기 때문인 것으로 사료된다(아칭현상).

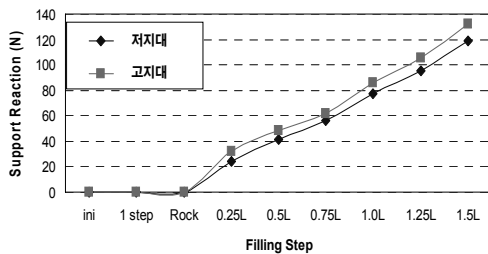
편경사에 따른 지점반력의 경향은 그림 12와 같다. 편경사가 0°일 경우는 좌우에 동일한 반력이 작용하나 편경사가 커질수록 고지대(좌측)의 지점반력은 증가하며

표 3. 굴착사면 경사와 편경사에 따른 반력편차

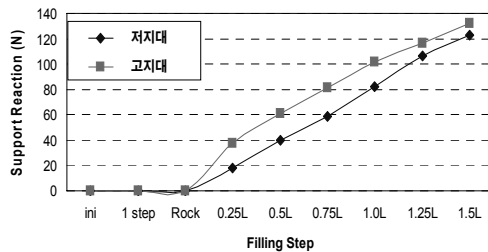
굴착사면 경사		편경사 0°		편경사 15°		편경사 30°		
		반력 (N)	편차	반력 (N)	편차	반력 (N)	편차	
0°	H1	R	129.3	1	118.9	1	122.9	1
		L	129.2	1.0	132.2	1.11	139.9	1.13
	H2	R	114.9	1	122.2	1	118.6	1
		L	114.8	1.0	122.6	1.09	135.4	1.14
15°	H1	R	121.0	1	109.8	1	107.9	1
		L	121.6	1.0	135.2	1.21	142.0	1.31
	H2	R	108.3	1	109.9	1	100.5	1
		L	108.3	1.0	129.7	1.18	130.8	1.30
30°	H1	R	104.8	1	117.1	1	122.9	1
		L	104.0	1.0	132.0	1.13	141.9	1.15
	H2	R	99.2	1	89.5	1	72.9	1
		L	99.1	1.0	130.9	1.46	147.3	2.02



(a) 편경사가 0°일 경우



(b) 편경사가 15°일 경우



(c) 편경사가 30°일 경우

그림 12. 편경사에 따른 지점반력 경향(단위: N)

저지대(우측)의 지점반력은 감소하는 경향이 관찰되었다. 즉, 편경사가 커질수록 좌우측의 반력편차도 증가하였다. 표 3은 되메움고 1.5D일 경우의 굴착사면 경사와 편경사에 따른 좌우측의 반력값 및 반력편차이며, 그 경향은 상기에 언급한 내용과 같다.

특이사항은 편경사, 되메움고, 굴착사면의 경사와는 무관하게 수평방향으로는 반력이 거의 작용하지 않았는데 이는 아치슬래브의 형상이 180°인 반원형이기 때문이며, 실무에서 주로 적용되는 아치슬래브의 형태는 반원형이 아닌 경우가 많으므로 실무적용시 검토결과가 상이할 수 있음을 밝혀둔다.

5. 결론

본 연구는 터널갱구부 및 저토피부 터널굴착시 안정성을 확보하고 공사비 절감과 자연친화적인 효과를 얻기 위하여 적용하는 반개착식 터널굴착 공법의 Arch Slab에 편토압이 작용할 경우에 거동특성을 실내모형실험으로 규명하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 아치슬래브의 축력은 편경사가 커질수록 고지대쪽에서는 압축력이 커지며, 압축력이 지배하던 저지대에서는 부분적으로 인장력으로 변화하는 경향을 나타내었다.

2. 아치슬래브의 모멘트는 축력의 경향과 거의 유사한 형태를 나타내었다. 즉, 편경사가 증가할수록 고지대에서는 압축모멘트가 커지며, 저지대에서는 인장모멘트가 발생하고 되메움 높이가 증가할수록 모멘트의 값도 증가하였다.
3. 아치슬래브의 내공변위는 전반적으로 내측(-)방향으로 발생하나, 편경사가 커질수록 저지대쪽 슬래브에서 외측(+)방향으로 변위가 발생하였다.
4. 지점부의 반력은 편경사가 증가할수록 고지대에서 증가하며, 저지대에서는 감소하였다. 지점반력의 좌우 편차는 편경사가 증가할수록 크게 나타났다.

본 연구는 편경사지에 반개착식 천층터널이 계획될 경우 구조물의 거동을 예측하기 위한 기초자료와 단면 계산 및 주요 계측위치 선정시 참고자료로도 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 더 많은 조건을 고려한 모

형실험 및 해석, 현장적용을 통하여 반개착식 천층터널의 최적설계를 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 안정환, 이상덕 (2009), “반개착식으로 굴착한 천층터널에서 Braced Rib Arch의 거동”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제4호, pp. 419-425.
2. 양문상, 이상덕 (2000), “수평 아치형 터널 갱구부 비탈면의 역학적 거동”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제2권, 제2호, pp. 50-61.
3. 황재홍 (2009), “프리캐스트 아치형 개착식 터널의 역학적 거동에 관한 수치해석”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 315-325.

접수일(2010.2.12), 수정일(2010.3.5), 게재확정일(2010.3.19)