

복개 구조물을 이용한 저토피 계곡부 터널의 통과방안에 대한 연구

A study on the shallow tunneling method using cover structure

정용진⁽¹⁾, Yong-Jin Chung, 남현우⁽²⁾, Hyun-Woo Nam, 최호식⁽³⁾, Ho-sik Choi.

¹⁾ (주) 서영 엔지니어링 과장, Manager, Seoyeong Engineering Co.,Ltd.

²⁾ (주) 서영 엔지니어링 전무, Senior Managing Director, Seoyeong Engineering Co.,Ltd.

³⁾ (주) 서영 엔지니어링 이사, Director, Seoyeong Engineering Co.,Ltd.

SYNOPSIS : Usually, Steel pipe grouting method or cut and cover method has been applied to tunnel with very shallow overburden or it is situated in valley. However, in case of lack of overburden height to reinforcement tunnel crown which is very difficult to construction. Also, application of cut and cover method that do not consider surrounding site condition causes popular enmity generation and environmental damage. It is the best alternative method that reduces the amount of excavated soil and excavate tunnel under ground to solve these problems. The tunneling method using cover structure which is to prevent a tunnel from collapse because this method can be reduce excavation area and construct tunnel under ground after set a cover structure and backfill ground.

In this study, to know more effective structure type, comparative analysis was performed to behavior characters of slab and arch type construction that can be used to cover structure. Also a 2D and 3D numerical analysis have been performed to verify the stability of ground during excavation. As the result, the tunneling method using cover structure that it can be good alternative method for tunnel with shallow overburden and it through valley

Keywords : cut and cover method, cover structure, shallow tunnel

1. 서 론

터널의 유효 토피고를 확보하지 못하는 저토피 터널의 경우에는 일반적으로 강관 등의 수평보강재를 이용하여 천단부를 보강한 후 굴착을 실시하거나 개착공법을 채택하는 것이 일반적이다. 그러나 천단부 보강을 위한 최소한의 토피가 확보되지 못하거나 주변의 여건상 굴착토사의 운반과 중장비의 진입이 어려운 경우에는 사실상 굴착보조 공법이나 개착공법의 적용에 시공상 큰 어려움이 따르게 된다. 또한, 주변현황을 고려하지 않은 개착터널 공법의 적용은 적잖은 민원발생의 우려와 환경피해의 문제점을 안고 있다. 이렇게 터널의 최소 유효토피고를 확보하지 못하고 개착공법의 적용이 곤란한 경우에는 원지반 상부의 개착 토사량을 최소화 하고, 지중에서의 굴착이 가능하게 하는 것이 최선의 대안이라 할 수 있다. 독일의 Sauer(1992)는 이러한 사항들을 고려하여 터널 상부 토피를 최소한으로 굴착하고 콘크리트 슬래브를 시공한 후 다시 되메움을 실시하여 지중에서 터널을 굴진해 가더라도 상부의 토피가 무너져 내리는 것을 방지하는 공법을 처음 제안하였다. 현재 이 공법은 유럽 및 일본 등에서 터널 상부에 주요 구조물이 있거나 토피고를 확보하지 못하는 경우에 터널과 상부 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 활발히 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 복개 구조물로 사용될 수 있는 슬래브와 아치 구조물에 대

하여 수치해석을 사용하여 유효성을 판단하였으며, 복개아치 공법이 적용된 OO터널에 대하여 시공단계를 고려한 3차원 FEM 해석을 수행하여 터널 및 상부 지반의 안정성을 평가함으로써 본 공법의 적용성을 판단하였다.

2. 복개구조물을 이용한 저토피 터널 통과 공법

본 공법은 터널 상부 토피를 최소한으로 굴착하고 콘크리트 구조물을 시공한 후 다시 되메움을 실시하여 지중에서 터널을 굴진해 가더라도 상부의 토피가 무너져 내리는 것을 방지하는 공법이며, 시공방법 및 순서는 그림 1과 같이 『굴착장비 투입-상부 토파기-복개 구조물부 토사 성토 및 성형-철근배근-복개아치 구조물 콘크리트 타설-양생-복토-뒷정리-터널시공』으로 이루어지며 개착터널 시공과는 달리 복개 구조물의 설치 단계가 추가된다.

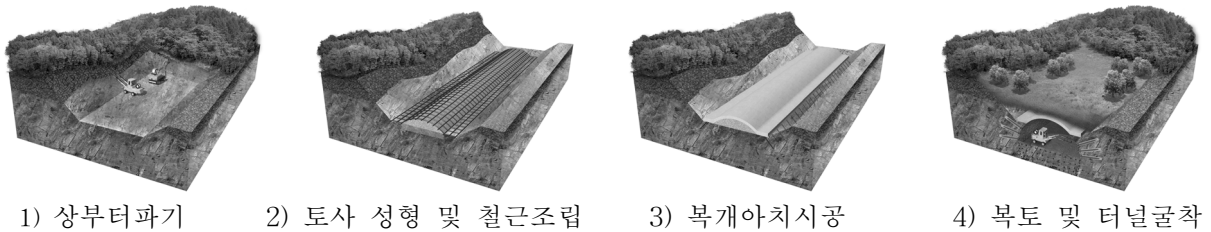


그림 1. 복개아치공법 시공순서도

3. 복개 구조물의 단면 형식 비교

3.1 개요

일반적으로 저토피 터널에 적용할 수 있는 복개구조물의 단면은 크게 슬래브 구조와 아치 구조로 구분할 수 있다. 프레임 슬래브라고 하는 콘크리트 슬래브의 거동특성에 대하여 정명근 등(2001)은 ‘프레임 슬래브는 내민보 거동과 연속보 거동을 보이며, 발생하는 응력도 되메움 토사의 높이에 지배되기 때문에 되메움 토사가 아주 크게 될 경우에는 막대한 보강이 필요할 것으로 분석하였다. 아치 구조물은 아칭효과에 의한 구조 역학적 장점이 뛰어난 것으로 알려져 있으며, 이러한 두 가지 형식의 구조물에 대하여 2차원 수치해석을 이용하여 각 구조물 형식에 대한 유효성을 평가 하였다.

3.2 복개 구조물 형식에 대한 해석

아치 구조물과 슬래브 구조물의 해석단면의 선정은 표 1과 같으며, 일반적으로 저토피 터널 구간에 적용할 수 있는 구조물 제원을 적용하였다. 해석의 주안점은 터널의 천단변위와 상부지반의 안정성 검토에 두었으며, 적용된 물성치는 표 2와 같다. 해석은 Midas-GTS를 사용하여 2차원 해석을 수행하였으며, 상부지반 굴착, 구조물 설치와 복토 등을 포함하여 총 10단계의 해석단계를 설정하여 해석을 수행 하였다. 그림 2는 해석단계별 천단변위 양상을 비교한 그래프로써 stage 1은 터널 상반 굴착 됐을 때이며, stage 6은 지보재 설치와 숏크리트 경화단계를 거쳐 터널 상·하반굴착이 완료된 단계이다.

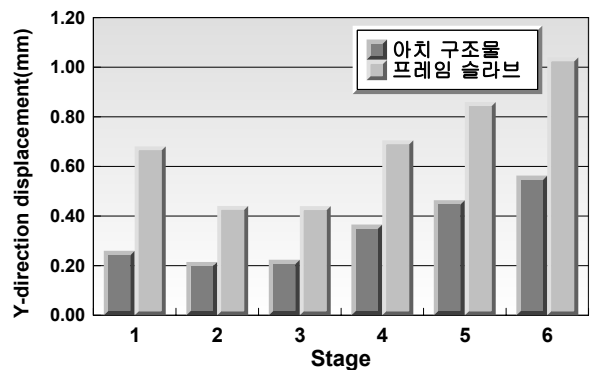


그림 2. 해석단계별 천단변위 양상

천단변위 양상을 살펴보면 굴착 초기부터 완료단계 까지 아치 구조물이 슬래브 구조물보다 약 2배 정도 천단침하가 감소한 것으로 나타나 아치구조물이 천단변위 억제에 보다 유리한 단면임을 알 수 있다. 이러한 결과 양상은 표 1의 해석결과로부터 파악될 수 있는데 프레임 슬라브의 경우 중앙부에 응력집중현상이 나타났으며, 구조물 응력이 고르게 분포한 복개 구조물의 경우 터널굴착 이완하중에 의한 터널 상부의 소성영역을 감소시켜 터널 천단 침하 및 지표침하를 줄이는 역할을 한 것임을 알 수 있다.

표 1. 해석단면 및 결과

아치 구조물		프레임 슬래브	
해석단면	숏크리트 전단력	해석단면	숏크리트 전단력
X방향 응력도	Yield Ratio	X방향 응력도	Yield Ratio

4. 복개 아치 공법의 적용 사례

본 장에서는 저토퍼 계곡부 터널 통과 공법으로 복개 아치 공법을 적용한 ‘○○지역 철도노반 공사’의 설계사례를 고찰하고 터널 및 주변지반의 안정성을 평가하기 위하여 복개 구조물의 구조해석과 터널의 안정성 해석을 실시하였다.

4.1 현황 및 지반조건

복개 아치 공법이 적용된 구간은 터널의 상부 토피가 0.7~5.8m로 굴착보조공법의 적용이 곤란한 저토퍼 계곡부를 통과하는 터널구간이다. 기반암은 세일이 협재 되어있는 사암이며, 그림 4에서 보이는 바와 같이 토층이 얇은 경암층으로 구성되어 있다.

주변현황으로는 사찰 신축부지 예정지와 소류지가 근접하고 있다(그림 3). 이에 본 구간을 개착터널로 계획할 경우 암발파로 인한 진동, 소음, 비산먼지 등으로 인한 민원발생과 자연훼손이 우려되며, 주변여건을 고려할 때 대형장비의 진입이 가능한 정도의 진입로 개설은 상당히 곤란한 실정이다. 또한, 작업장을 횡단하는 계곡수의 유역면적이 113,300m²로 강우강도

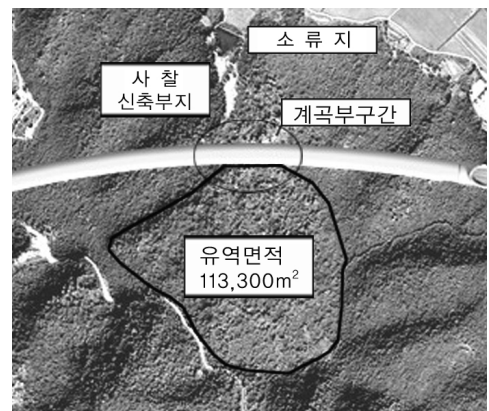


그림 3. 검토구간의 평면 현황

를 고려한 합리식을 이용하여 유입량을 산정한 결과 작업장내에 최대 약 1m³/sec의 계곡수가 유입되는 것으로 예상되어 공사기간 동안의 계곡수 처리가 상당히 곤란하고 물고임으로 인한 터널구조물 기초지반의 중성화 및 열화 발생으로 인한 원지반 강도의 저하로 구조물 안정성의 저하가 예상된다. 따라서 이러한 현황들을 고려하여 본 구간에는 개착 공법 대신 소형장비를 이용하여 굴착이 가능한 복개 아치 구조물을 이용한 통과공법을 계획하였다.

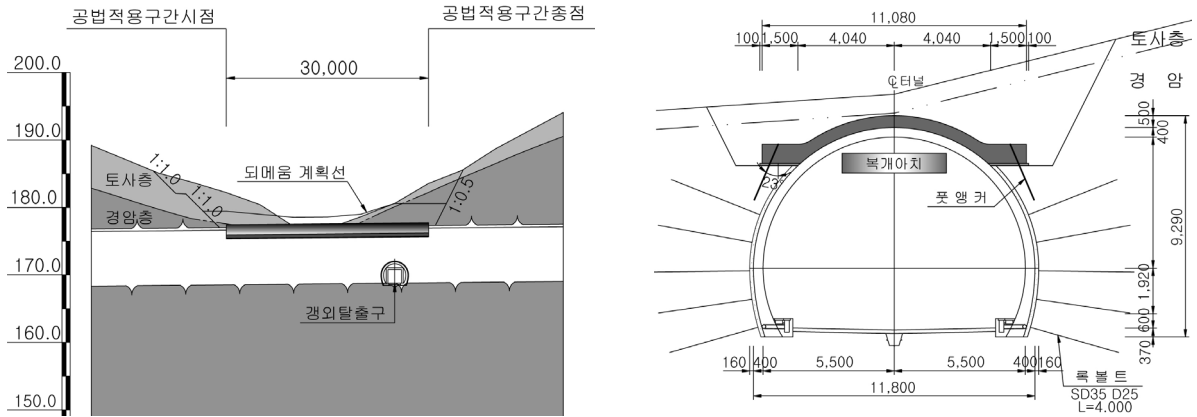


그림 4. 검토구간의 종단 및 보강단면

4.2 수치해석을 통한 안정성 검증

본 절에서는 복개 아치 구조물에 대한 2차원 구조해석과 복개아치 공법 적용구간을 포함하는 3차원 지반해석을 수행하여 구조물의 안정성과 터널 및 상부지반의 안정성을 검토하였다. 표 2는 해석에 적용된 지반 및 보강재의 물성치를 보여주고 있다.

표 2. 수치해석에 사용된 기준 및 물성

구조해석	<ul style="list-style-type: none"> 콘크리트 설계기준강도 $f_{ck}=240 \text{ kgf/cm}^2$, 탄성계수 $E_c=2.35 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 최대 되메움 토피고 3.0m 	지반해석	구분	단위중량 (tonf/m ³)	점착력 (tonf/m ²)	내부 마찰각(°)	탄성계수 (tonf/m ²)	포아송비
	토사		1.80	1.50	30	3,000	0.34	
	경암		2.40	80.0	34	500,000	0.25	
	연성 숏크리트		2.35	-	-	500,000	0.20	
	강성 숏크리트		2.35	-	-	1,500,000	0.20	
	록볼트		-	-	-	20,000,000	0.19	

4.2.1 복개아치 구조물 구조해석 결과

터널상부의 복개아치 구조물에 대하여 구조 해석프로그램인 Strand7을 이용하여 되메움 토사 하중에 대한 구조물 안정성을 검토하였으며, 구조해석에 사용된 입력치는 표 2와 같다.

그림 5는 구조해석 결과로써 복개 아치 구조물에 발생될 것으로 예상되는 모멘트, 축력 및 전단력도이다. 모멘트 및 축력 발생경향은 아치부에서 각각 최대 3.674tonf·m, 71.088tonf가 발생 하였으며, 전단력의 경우 지점부에서 최대 17.350tonf가 발생하였다. 구조해석 검토 결과에 따라 주철근을 D19@125로 배근하여 안정성을 확보하였으며, 외력을 축력으로 저항하는 아치부재의 구조적 장점을 효과적으로 발현하기 위하여 복개 아치 양측지점에 포앵커를 설치하여 변위발생을 방지하였다.

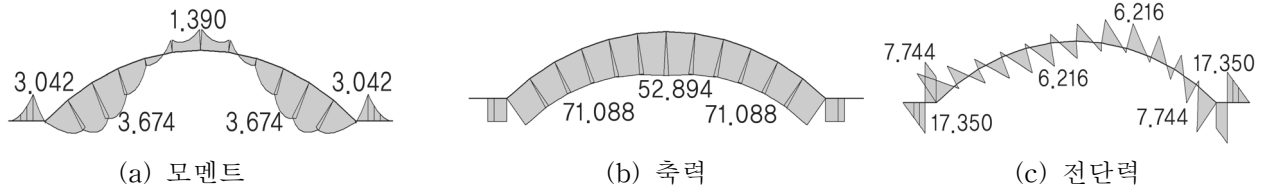


그림 5. 구조해석 결과

4.2.2 지반 해석결과

터널 및 상부 지반의 안정성을 검토하기 위하여 3차원 지반해석을 실시하였으며, 그림 6은 지반 해석 프로그램인 Midas-GTS를 사용하여 작성된 3차원 유한 요소망이다. 지반해석에 있어서는 시공중 및 완료후의 거동을 평가하고자 터널의 시공순서를 세부적으로 반영하였으며, 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따르는 탄소성 재료로 보강재 및 구조물은 탄성재료로 해석에 적용하였다.

그림 7과 8은 터널의 굴착에 따른 지반변위 발생경향과 지반 최대 주응력 분포경향을 나타내고 있는데 복개아치의 설치로 인하여 터널 상부의 변위 및 지반응력의 집중 현상도 크게 감소하는 것으로 나타났다. 터널 굴착에 따른 천단변위 양상을 나타내는 그림 9의 그래프를 살펴보면 굴착이 진행됨에 따라 변위량이 증가하다 -0.8mm에서 변위가 수렴하는 것으로 분석되었다. 그림 10은 복개아치 설치에 따른 터널 지보재의 최대 휨압축응력 발생 경향을 나타내는 그림으로 슛크리트 최대 휨압축응력은 68.9tonf/m²로 허용치 이내의 값이 발생하여 터널의 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

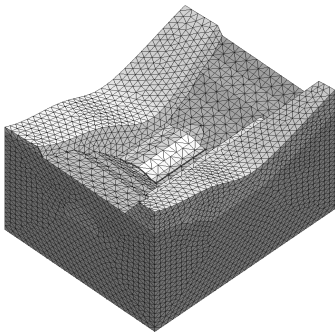


그림 6. 3차원 해석 mesh

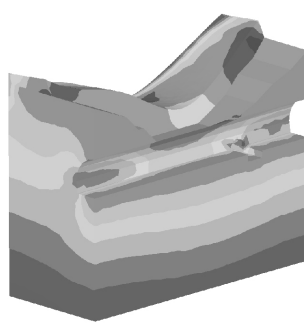


그림 7. 연직방향 변위도

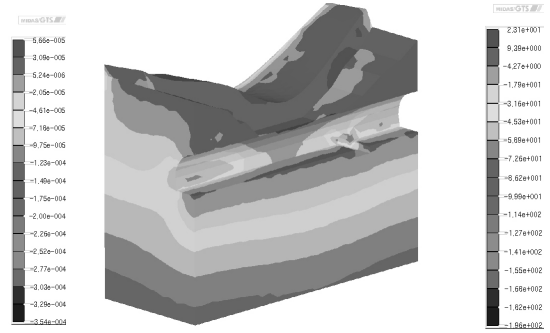


그림 8. 최대 주응력도

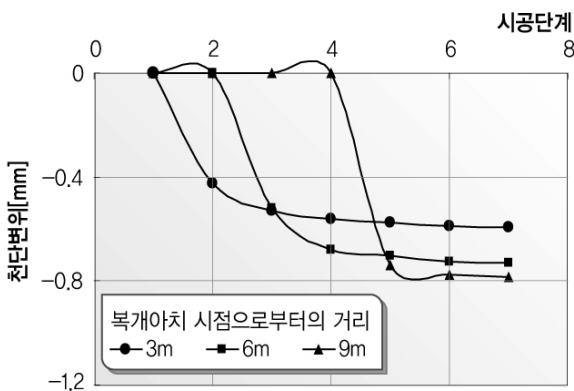


그림 9. 천단변위 발생경향

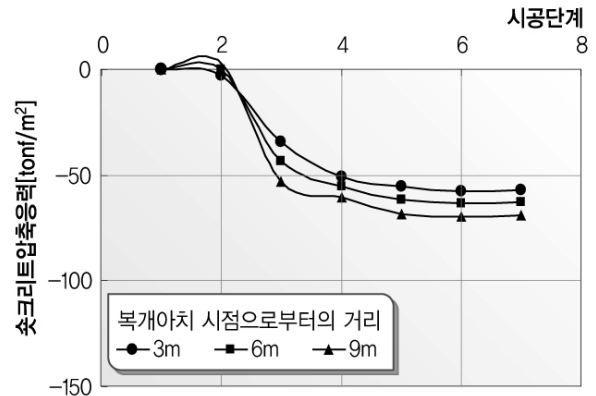


그림 10. 슛크리트 압축응력 발생 경향

5. 결 론

본 연구에서는 저토피 계곡부 구간을 통과하는 터널의 굴착보조 공법중 복개구조물을 이용하는 공법에 대한 적용성 및 유효성을 판단하고자 수치해석을 이용하여 구조물 및 지반의 안정성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저토피 계곡부를 통과하는 터널의 굴착보조공법으로써 복개 구조물을 이용하는 공법은 장비 진입, 굴착으로 인한 민원, 계곡수의 처리문제 등을 해결할 수 있는 시공법임을 알 수 있었다.
2. 현장에서 적용 할 수 있는 슬래브 형태와 아치형태의 구조물에 대하여 안정성 검토를 실시한 결과 구조 역학적 장점을 가진 아치구조물이 터널 구조물과 주변 지반의 안정성에 효과적인 것으로 나타났으며, 본 공법의 적용은 아주 유효한 시공법이란 결론을 얻었다.
3. 복개 아치공법을 적용함으로써 터널굴착 이완하중에 의한 터널 상부의 소성영역의 분포가 감소하여 지표침하를 크게 줄일 수 있으며, 터널 굴착시에도 안정된 터널 공사가 가능할 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 정명근 등.(2001), “프레임 슬래브 공법을 적용한 천층터널의 시공법 연구”, 지반공학회 봄 학술발표회, pp. 113-120.
2. Desenritter, S. And Zeidler, K.(1992), “The Schürzeburg Tunnel, Oberrieden,” *Tunnel*, Feb., pp. 58-64
3. Deinhard, M., Prinz, H. And Zeidler, K.(1991), “Oberrieden Road Tunnel : Variations on an NATM Theme,” *Tunnels and Tunnelling*, Nov., pp. 49-51
4. Sauer, G.(1988), “When an Invention is Something New: from Practice to Theory in Tunnelling,” *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Section A, Mining Industry, Vol. 97, Apr., pp. A94-A108.
5. Sauer, G.(1992), “The Schürzeberg Tunnel. Oberrieden,” Sept., *Proceedings, First International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures*, Ljubljana, Slovenia, Chap.2, pp. 151-165