

# 굴착사면 변화에 따른 복개 터널구조물의 역학적 거동에 관한 수치해석적 연구

A Study on the Behavior of Cut and Cover Tunnel according  
to the Excavation Plane by Numerical Analysis



배규진\*  
Gyu-Jin Bae



이석원\*  
Seok-Won Lee



이규필\*  
Gyu-Phil Lee



박시현\*  
Si-Hyun Park

## Abstract

The structural analysis such as rigid frame analysis has been used for the design of cut and cover tunnel due to its simplicity and convenience. This analysis, however, could not account for the geometrical factors such as interface elements, slope of excavation plane, distance between lining and excavation plane, etc. To develop the analysis technique and design technology for the cut and cover tunnel, in this study, the numerical analyses considering not only geometrical but geotechnical factors are conducted. Especially, the effects on the mechanical behaviors of cut and cover tunnel due to the slope of excavation plane and the distance between lining and excavation plane are mainly focused in this study.

Keywords: Cut and cover tunnel, Numerical analysis, Bending moment, Shear force, Displacement

\*1 한국건설기술연구원 토목연구부 연구위원

\*2 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

\*3 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

## 요 지

현재 복개 터널 라이닝의 설계는 설계상의 간편성으로 인해 복개 터널의 라이닝에 대한 구조해석적 기법인 Rigid Frame Analysis 가 널리 사용되고 있으나, 이는 되메움 지반과 터널 라이닝 사이의 상호작용(Interaction) 메카니즘을 적절히 반영하지 못하게 될 뿐만 아니라, 굴착 사면의 경사, 굴착폭 및 지표면의 경사 등에 의한 영향을 고려하지 못하는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 복개 터널구조물의 합리적이고 경제적인 설계를 위한 기본연구로써, 좁은 되메움 공간에서의 토압경감과 콘크리트 라이닝과 성토체의 상호작용을 고려하기 위하여 지반공학적 모델링 기법을 이용한 수치해석을 실시하였다. 또한 복개 터널구조물의 역학적 거동 영향인자로써 굴착사면의 경사 및 콘크리트 라이닝과 굴착사면의 이격거리 등을 고려하였으며, 각 영향인자가 복개 터널구조물의 역학적 거동에 영향을 미치는 정도를 분석하였다.

주요어: 복개 터널구조물, 수치해석, 휨모멘트, 전단응력, 변위

## 1. 서론

우리나라는 산지가 68%이상을 차지하고 있기 때문에 도로나 철도를 신설할 때 터널로 시공하기 어려운 구간을 중심으로 한 대절토 사면구간이 필연적으로 많이 발생하게 되며, 이러한 대절토 사면을 갖는 도로나 철도는 현지의 묘소, 기존 횡단도로, 개인 소유지 등을 훼손시킬 수 있고 인접마을의 주민과 야생동물의 왕래를 막을 수 있어 현재 많은 민원이 공사현장에서 발생하고 있으며, 최근 이러한 문제해결을 위하여 우리나라에서는 지방도로, 철도, 고속철도 건설을 중심으로 절토사면 구간에 대해 환경친화적인 복개 터널구조물을 시공하는 사례가 급증하고 있다.

이러한 복개 터널구조물의 라이닝은 상재하중, 토압, 수압, 자중, 터널 내부의 건축하중, 온도변화 및 건조수축, 지진하중 등과 같은 다양한 현장조건 등을 고려하여 해석 및 설계를 수행하고 있다. 이러한 고려조건 가운데 복개 터널 라이닝에 작용하는 토압은 콘크리트 라이닝 완공 후 성토되는 성토체를 하중으로 산정하여 해석을 실시하는 구조공학적 모델링 기법이 널리 적용되고 있으나, 이러한 구조공학적 모델링 기법은 복개 터널 라이닝에 인접하여 시공되는 굴착사면의 경사 및 콘크리트 라이닝과 굴착사면의 이격거리, 굴착사면의 소단, 성토체 토층의

성토사면 구배 및 형상, 토피고 등과 같은 지형적인 영향인자와 Soil Arching, 콘크리트 라이닝과 성토체 접촉면의 경계요소 및 원지반의 측압 등과 같은 지반공학적 측면의 영향인자를 고려하기에 많은 어려움이 있다(배규진과 이규필, 2001).

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Kovari(1982)는 유한 요소 해석법을 이용하여 되메움 지반과 터널 라이닝 사이의 상호작용을 고려한 설계 방법을 제안하였으나, Kovari(1982)가 제안한 유한 요소 해석법에서는 성토 단계별 되메움 지반을 지반 모델 자체로 고려하지 않고 상재하중과 수평하중으로 환산하여 작용시킴으로써 되메움 지층이 터널 라이닝의 변형에 대한 지반반력을 생성하지 못하는 문제점이 발생한다. 더욱이 터널 라이닝과 되메움 지반 사이 및 굴착 사면과 되메움 지반 사이의 접촉면에서의 상호작용(Interaction)을 고려하지 않음으로써 되메움 지반 내부에서 발생하는 아칭효과에 의한 토압의 변화를 제대로 반영하지 못하는 문제점을 갖고 있다. 이에 대해 최근 유건선(2001)은 아칭형 복개 터널구조물의 시공 상황을 그림 1과 같이 유한차분법(FDM)을 이용하여 수치 해석적 연구를 실시하였다. 이 연구에서는 되메움 지반과 터널 라이닝과의 경계면 및 굴착사면과의 경계면에 경계요소를 도입하여 벽면 마찰저항을 고려함으로써 아칭효과를 고려하였다. 단계별 되메움에 의한 하중조건은

퇴매음 지반의 자중에 의해서만 고려하였고, 터널 주변의 지형적인 조건 및 퇴매음 지반의 물리적인 성질에 의한 영향을 고찰하였다. 그러나, 실 대형 규모의 현장실험으로 인하여 실험 횟수의 제한으로 충분한 실험결과와 뒷받침이 없기에 변수 변환연구(Parametric Study)에 중점을 두었으며, 경계요소의 물성치에 대한 근거 및 영향평가가 충분히 이루어지지 않았다(Handy, 1985; Kellogg, 1993).

따라서 본 연구에서는 복개 터널구조물의 합리적이고 경제적인 설계를 위한 기본연구 및 복개 터널구조물의 역학적 거동 분석을 위한 모형 토조실험의 기본자료를 획득을 위하여, 좁은 퇴매음 공간에서의 토압경감과 콘크리트 라이닝과 성토체의 상호작용을 고려하기 위하여 지반 공학적 모델링 기법을 이용하였다. 또한 복개 터널구조물의 역학적 거동 영향인자로서 굴착사면의 경사 및 콘크리트 라이닝과 굴착사면의 이격거리(이하 이격거리) 등을 고려하였으며, 각 영향인자가 복개 터널구조물의 역학적 거동에 영향을 미치는 정도를 분석하였다. 일반적으로 성토체는 원지반의 지형조건을 그대로 복원하는 등의 목적으로 일정 구배를 갖도록 설계 및 시공되며, 이로 인하여 콘크리트 라이닝에 편토압이 작용하게 되어 복개 터널구조물의 거동에 영향을 미치게되나, 본 논문에서는 고려하지 않고 추후 연속적인 논문에서 편토압의 영향을 논하고자 한다.

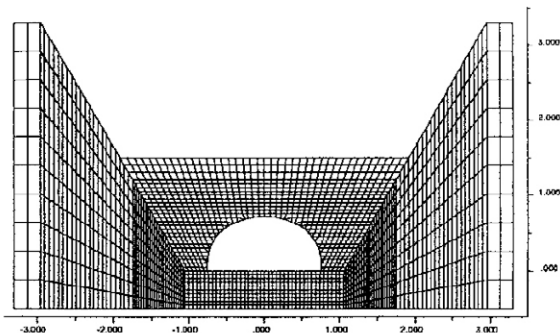


그림 1. FDM 해석 예(유건선, 1997)

## 2. 수치해석 조건 및 입력 Parameters

### 2.1 수치해석 조건

굴착사면의 구배 및 이격거리 변화에 따른 복개 터널 라이닝에 발생하는 휨모멘트, 전단력 및 축력 등과 같은 부재력과 수평방향 변위 및 연직방향 변위 등과 같은 복개 터널의 기본거동 분석을 위하여 수치해석을 실시하였다. 구조공학적 모델링을 통한 복개 터널구조물의 거동분석은 범용 구조해석 프로그램인 SAP 2000을 이용하였으며, 지반공학적 모델링 기법을 이용한 수치해석은 현재 유럽과 동남아시아 등지에서 가시설 흙막이 구조물, 연약지반, 성토 및 성토사면 안정, 실드터널 등과 관련된 지반 공학적 제반 문제 해결을 위하여 널리 적용되고 있는 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS(네덜란드 PLAXIS사, Ver. 7.2)를 이용하였다.

수치해석을 위한 기본 단면은 2차선 도로터널 단면(폭 12m, 높이 8.5m)을 선정하였다. 수치해석시 콘크리트 라이닝은 Beam요소로 모델링하였으며, 지반요소는 2차원 평면변형(Plane Strain)요소로 모델링하였으며(그림 2 참조), 콘크리트 라이닝 측벽부와 바닥 슬라브의 연결부

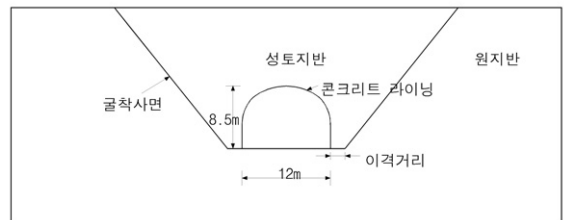


그림 2. 수치해석을 위한 터널 표준단면 및 개념도

표 1. 결과 분석을 위한 부호규약

휨모멘트	축력	수평변위	연직변위
(-)			
	압축 : + 인장 : -	→ : + ← : -	↑ : + ↓ : -

의 구속조건은 힌지(Hinge)로 모델링하였다. 복개 터널 구조물의 라이닝은 상재하중, 수압, 터널 내부의 건축하중, 온도변화 및 건조수축, 지진하중 등과 같은 현장조건은 고려하지 않고, 성토하중만을 고려하였다. 수치해석 결과 분석을 위한 단면력 및 변위의 부호규약은 표 1과 같다.

## 2.2 수치해석을 위한 원지반정수

복개 터널 라이닝의 설계를 위한 원지반의 강도정수는 원위치 시험 등을 통하여 합리적인 값을 산정하여야 하며, 이러한 강도정수는 현장의 지질공학적 특성에 따라 넓은 범위를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 위한 기본 입력물성치 산정을 위하여 한국건설기술연구원(1998)에서 수행한 “국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구(I)”의 조사결과를 토대로 하여 원지반 강도정수를 산정하였다. 국내터널 38개소에 적용된 원지반의 입력물성치 가운데 터널의 수치해석에 필요한 탄성계수, 점착력, 내부마찰각 등을 산악터널 및 도심지터널 등과 같이 각 입지조건에 따라 분류하여 평균값을 산정하면 표 2와 같다.

일반적으로 도심지 터널에서는 현장 특성상 성토사면의 구배, 형상 및 토피고 등과 같이 다양한 조건의 발생 및 상기 영향인자의 변화요인이 적다고 판단되므로, 본 연구에서는 표 2에서 제시한 물성치에서 산악터널에 대한 조건을 가정하여 입력 물성치를 산정하였다(표 4 참

조).

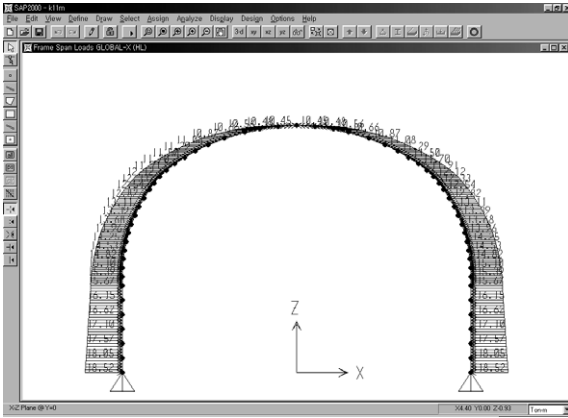
국내 터널설계에서 적용되고 있는 측압계수는 암반의 종류(풍화토, 풍화암, 연암 및 보통암 또는 경암)와 터널의 입지조건에 따라 분류할 수 있으며, 전체 조사대상의 암반분류에 따른 측압계수의 적용범위는 풍화토와 풍화암에 대하여  $K_0=0.4\sim0.55$ 의 값을 적용하였고, 연암, 보통암 및 경암에 대해서는 최소 0.33에서 최대 1.5의 범위의 값이 적용되는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 이러한 기존의 연구결과를 토대로 원지반 조건이 풍화암인 경우  $K_0=0.5$ , 연암 및 경암인 경우 각각  $K_0=1.0$ 으로 적용하였다.

## 2.3 성토체 지반정수

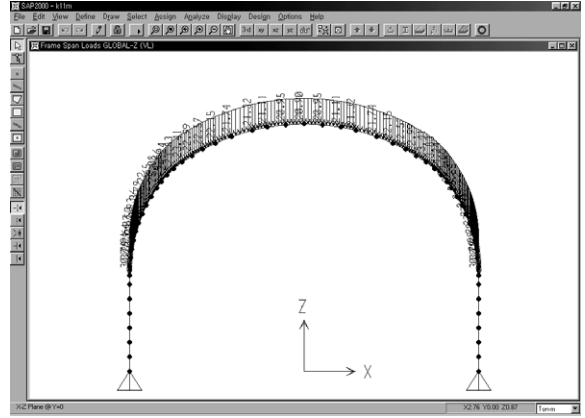
복개 터널 라이닝의 시공시 성토체의 지반정수는 성토시 다짐도 및 성토체의 심도변화 등에 따라 변화한다. 본 연구에서는 성토체의 입력물성치 산정을 위하여 현재 복개 터널 라이닝의 해석에 널리 적용되고 있는 구조공학적 해석기법을 이용하여 변위 및 부재력을 우선 산정하였다. 동일한 조건에 대하여 지반공학적 모델링 기법을 이용한 수치해석을 실시하고, 상기 두 해석기법에 의한 콘크리트 라이닝에 발생하는 변위 및 부재력 등을 비교하여, 유사한 결과를 나타내는 입력물성치를 산정하기 위하여 탄성계수, 점착력 및 내부마찰각을 매개변수로 하는 Parametric Study를 수행하였다. 이렇게 구조해석과 지반공학적 모델링기법을 이용한 수치해석 결과가 유사하

표 2. 입지조건에 따른 입력자료의 평균 물성치(한국건설기술연구원, 1998)

입지조건	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )		점착력 (kN/m <sup>2</sup> )		내부마찰각 (°)	
	산악터널	도심지터널	산악터널	도심지터널	산악터널	도심지터널
풍화토	$2.6 \times 10^4$	$4.4 \times 10^4$	40.0	56.0	31.3	28.9
풍화암	$3.9 \times 10^5$	$2.4 \times 10^5$	184.0	206.0	32.4	33.5
연암	$2.1 \times 10^6$	$1.1 \times 10^6$	928.0	709.0	37.0	37.5
보통암 및 경암	$1.9 \times 10^7$	$5.5 \times 10^6$	1394.0	2288.0	42.6	42.3



(a) 수평토압



(b) 연직토압

그림 3. 지반정수 산정을 위한 구조해석 모델링

계 지반정수를 산정한 이유는 추후 수행될 수치해석 결과를 구조해석결과와 비교하기 위한 것도 있다.

성토체의 물성치 산정을 위한 Parametric Study 해석조건은 콘크리트 라이닝 천단부로부터 성토고 1D(D : 터널 단면 등가 환산직경, 약 10.66m), 성토체 단위중량  $19\text{kN/m}^3$ 로 가정하였으며, 수평방향 토압은  $K_0$  Condition을 기준으로 하였다. 범용 구조해석 프로그램인 SAP 2000을 이용한 수치해석시 콘크리트 라이닝에 작용하는 전 토피고를 연직토압 및 수평토압을 산정하였다(그림 3 참조). 지반공학적 모델링을 통한 수치해석시 해석영역은 콘크리트 라이닝의 좌·우측 측벽부로부터 3D, 하부는 1.5D로 모델링하여 End Effect에 의한 해석 결과의 오류를 최소화하였다(그림 4 참조).

또한 구조해석 프로그램에서는 굴착사면 및 콘크리트 라이닝과 굴착사면과의 이격거리 등과 같은 현장조건을 모델링하기에 부적절하므로, 지반공학적 모델링 해석시에도 굴착사면 등과 같은 현장조건을 모델링하지 않았다. 성토체와 콘크리트 라이닝의 상호작용이 수반되는 과정을 수치해석적으로 모사하기 위하여, 수치해석시 터널 측에 연직인 평면단면을 고려하였으며, 성토체의 단계별 성토과정 등과 같은 현장시공조건을 모델링하였다. 지반공

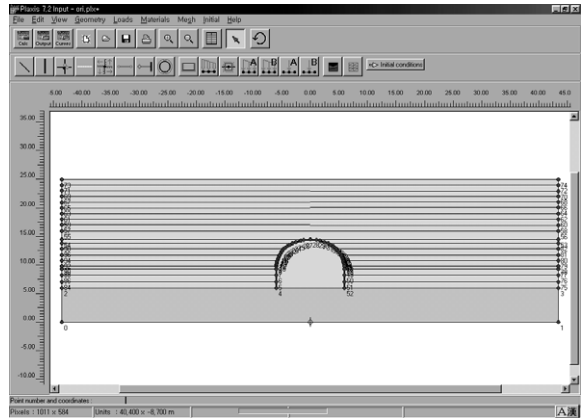


그림 4. 지반정수 산정을 위한 지반공학적 모델링

학적 모델링을 통한 수치해석시에는 성토체의 토압작용 메커니즘을 보다 정확하게 규명하기 위하여, 성토체와 접촉하는 콘크리트 라이닝과의 경계면에 경계요소(Interface Element)를 모사하여, 이들 경계면에서 발생하는 마찰력을 고려하였다. 동일 조건에 대한 구조해석 프로그램인 SAP 2000과 지반공학적 수치해석 프로그램인 PLAXIS를 이용하여 성토체의 입력 물성치 산정을 위한 Parametric Study를 수행한 결과 성토체의 지반정수는 탄성계수  $35,000\text{kN/m}^2$ , 내부마찰각  $30^\circ$ , 점착력

표 3. 성토체 입력 물성치 산정을 위한 Parametric Study 결과

	SAP 2000 해석결과	PLAXIS 해석결과	Error(%)
천단부 휨모멘트	46.4 t-m	50.3 t-m	8.4
측벽부 휨모멘트	22.1 t-m	19.1 t-m	13.6
천단부 변위	3.2mm(↓)	3.2mm(↓)	0.0
측벽부 변위	0.3mm(←)	0.27mm(←)	10.0

표 4. 수치해석을 위한 지반 조건별 입력물성치

		단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )	포아송비	점착력 (kN/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)
성토체		19	$3.5 \times 10^4$	0.35	10	30
원지반	풍화암	23	$3.9 \times 10^5$	0.30	184	33
	연암	25	$2.1 \times 10^6$	0.27	930	37
	경암	27	$1.9 \times 10^7$	0.23	1400	43

10kN/m<sup>2</sup>로 산정하였으며, 상기에서 제시한 방법과 같이 구조해석과 수치해석 결과를 동일하게 유도하는 개념으로 지반정수를 산정하여 본 결과, 다른 연구의 수치해석에서 사용하는 성토체의 입력 물성치와 유사하게 산정되었으며, 따라서 성토체의 물성치는 적절히 산정된 것으로 판단된다(이상덕, 1999). 두 해석기법 해석결과를 비교 및 지반 조건별 입력 물성치를 정리하면 표 3 및 표 4와 같다.

### 3. 영향인자 분석을 위한 수치해석 개요

콘크리트 라이닝 인근에 위치하는 굴착사면의 구배 변화 및 이격거리 변화가 복개 터널구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 굴착사면의 구배는 그림 5에서 보이는 바와 같이 원지반 조건이 풍화암의 경우 사면구배 1:1, 연암 1:0.8, 경암 1:0.5로 가정하였으며, 각 사면구배 변화 조건별로 이격거리를 1m, 2m, 3m로 변화시켜 각각의 이

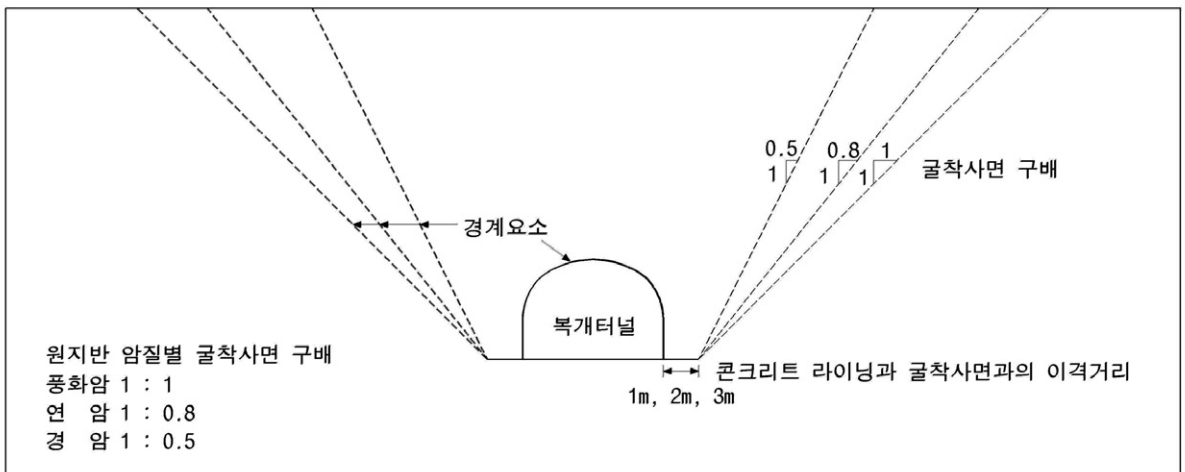


그림 5. 수치해석 개념도

표 5. 경계요소의 범위

지반의 종류	대상 구조물의 재질	R	비고
sand	steel	2/3	
	concrete	0.8~1.0	
clay	steel	0.5	
	concrete	0.7~1.0	

$c_{soil}$  : 경계요소와 접하는 흙의 점착력

$\phi_{interface\ element}$  : 경계요소의 내부마찰각

$\phi_{soil}$  : 경계요소와 접하는 흙의 내부마찰각

R : 계수

이격거리 조건에서 굴착사면의 구배 변화에 의한 영향을 검토하였다.

경계요소의 모델링은 식 (1) 및 (2)에서 보이는 바와 같이 지반조건과 접촉매질의 종류에 따라 강도정수( $c$ ,  $\phi$ )에 일정한 계수(R)를 이용하여 경계요소를 모델링하는 방법을 적용하였다. 경계요소의 모델링을 위한 계수는 표 5에서 보이는 바와 같이 지반의 종류 및 흙과 접하게 되는 대상 구조물의 재질에 따라 그 값이 변화하는 것으로 제안되고 있다. 본 연구에서는 수치해석시 콘크리트 라이닝과 성토체의 접촉면 및 굴착사면과 성토체의 접촉면에는 경계요소를 고려하였으며, 경계요소 모델링을 위한 계수(R)는 콘크리트와 모래의 접촉면 고려시 0.8~1.0의 계수 범위 내에서 중앙값인 0.9로 가정하였다.

$$c_{interface\ element} = R \cdot c_{soil} \quad (1)$$

$$\tan \phi_{interface\ element} = R \cdot \tan \phi_{soil} \quad (2)$$

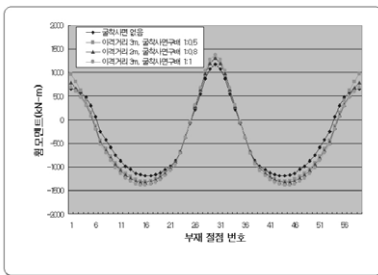
여기서,  $c_{interface\ element}$  : 경계요소의 점착력

## 4. 복개 터널구조물의 수치해석 결과 및 분석

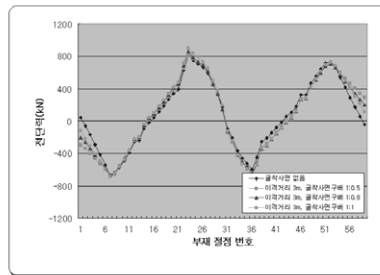
### 4.1 영향인자별 결과분석

복개 터널구조물의 영향인자별 결과분석을 위하여 최대 성토량 조건인 굴착사면 구배 1:1.0 또는 이격거리 3m를 기준으로 영향인자 변화에 따른 단면력 및 변위의 변화 정도를 분석하였으며, 상기 내용을 정리하면 표 6 및 표 7과 같다. 이격거리 변화 및 굴착사면 구배 변화 등과 같은 해석조건 가운데 이격거리가 3m인 경우, 굴착사면 구배변화에 따른 콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 및 변위의 변화는 그림 6 및 그림 7과 같다.

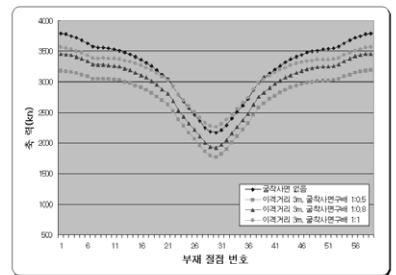
굴착사면 구배가 변화하는 경우 단면력 및 변위의 최대 변화율은 축력 및 수평변위에서 동일하게 19.5%, 이격거리가 변화하는 경우 단면력 및 변위의 최대 변화율은 축력과 수평변위에서 각각 10.1%, 10.5%로 나타났다. 따라서 지형적 영향인자 가운데 굴착사면 구배변화가 이격거리 변화보다 콘크리트 라이닝의 거동에 큰 영향을 미치는



(a) 휨모멘트 분포도

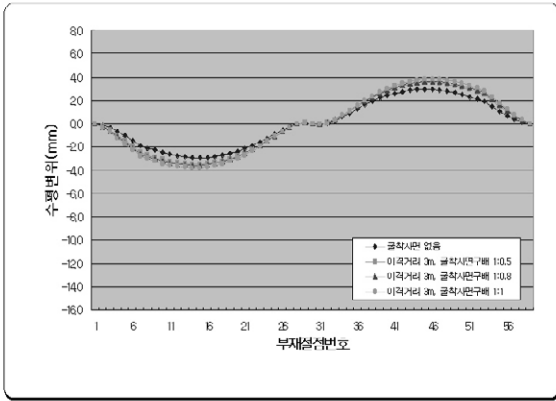


(b) 전단력 분포도

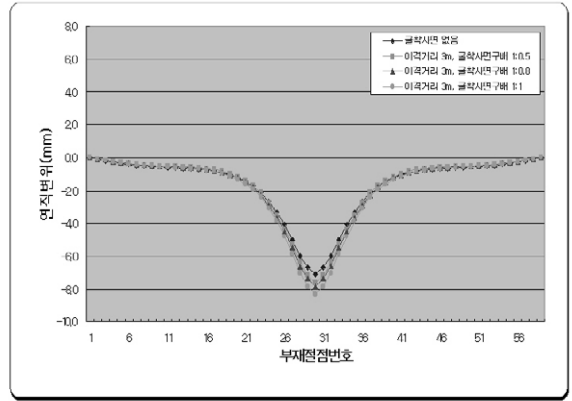


(c) 축력 분포도

그림 6. 굴착사면 구배 변화에 따른 단면력 분포도(이격거리가 3m인 경우)



(a) 수평변위 분포도



(b) 연직변위 분포도

그림 7. 굴착사면 구배 변화에 따른 변위 분포도(이격거리가 3m인 경우)

것으로 판단된다.

성토량이 감소하는 조건으로 이격거리 또는 굴착사면 구배가 변화하는 경우 콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 및 변위는 일반적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 그림 8 ~그림 10에서 보이는 바와 같이 콘크리트 라이닝에 작용하는 수평토압 및 연직토압의 경우 이격거리가 1m와 3m인 경우에는 굴착사면 구배가 완만해짐에 따라 성토량이 증가하여 두 토압이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 이격거리가 2m인 경우 콘크리트 라이

닝에 작용하는 수평토압은 굴착사면 구배가 1:0.8일 때 가장 크게 작용하여, 콘크리트 라이닝의 횡방향 거동의 구속효과로 인하여 변위가 감소하고, 특히 휨모멘트 및 변위의 감소가 크게 나타났다. 이는 복개 터널구조물의 거동은 단지 성토량의 영향뿐만 아니라 지형적인 영향에 의하여 영향을 받기 때문인 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구를 수행하고 있다.

또한 굴착사면의 구배가 1:0.5 및 1:0.8인 경우 일반적으로 예상되었듯이 이격거리가 증가하게 되면 성토량이 증

표 6. 굴착사면의 구배 변화에 따른 단면력 및 변위의 변화 관계

구분		최대휨모멘트		최대전단력		최대축력		수평변위		연직변위	
이격거리	굴착사면구배	kN-m	감소율(%)	kN	감소율(%)	kN	감소율(%)	mm	감소율(%)	mm	감소율(%)
1m	1:0.5	1264.3	12.5	787.5	13.3	2860.8	19.5	-3.4	19	-7.3	15.1
	1:0.8	1310.3	8.1	830.6	8.6	3243.8	8.7	-3.7	11.9	-7.8	9.3
	1:1.0	1424.5	-	908.3	-	3551.9	-	-4.2	-	-8.6	-
2m	1:0.5	1280.5	9.7	814.1	10.2	3040.7	16.1	-3.5	14.6	-7.5	12.8
	1:0.8	1241.9	12.5	821.7	9.4	3222.6	11.1	-3.3	19.5	-7.4	14
	1:1.0	1418.6	-	906.7	-	3625.5	-	-4.1	-	-8.6	-
3m	1:0.5	1302.6	5.2	820.3	9.5	3181.5	10.8	-3.5	7.9	-7.6	8.4
	1:0.8	1304.5	5.1	857.4	5.4	3460.1	3	-3.6	5.3	-7.8	6
	1:1.0	1374.4	-	906.3	-	3568.0	-	-3.8	-	-8.3	-

※ 굴착사면 구배 1:1.0 기준



표 7. 이격거리 변화에 따른 단면력 및 변위의 변화 관계

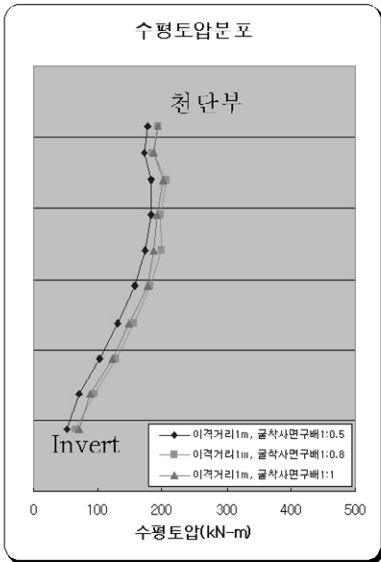
굴착사면구배	구분 이격거리	최대휨모멘트		최대전단력		최대축력		수평변위		연직변위	
		kN-m	감소율(%)	kN	감소율(%)	kN	감소율(%)	mm	감소율(%)	mm	감소율(%)
1 : 0.5	1m	1264.3	2.9	787.5	4	2860.8	10.1	-3.4	2.9	-7.3	4
	2m	1280.5	1.7	814.1	0.8	3040.7	4.4	-3.5	0	-7.5	1.3
	3m	1302.6	-	820.3	-	3181.5	-	-3.5	-	-7.6	-
1 : 0.8	1m	1310.3	0.4(증)	830.6	3.1	3243.8	6.3	-3.7	3.8(증)	-7.8	0
	2m	1241.9	4.8	821.7	4.1	3222.6	6.9	-3.3	8.3	-7.4	5.1
	3m	1304.5	-	857.4	-	3460.1	-	-3.6	-	-7.8	-
1 : 1.0	1m	1424.5	3.6(증)	908.3	0.2(증)	3551.9	0.5	-4.2	10.5(증)	-8.6	3.6(증)
	2m	1418.6	3.2(증)	906.7	0	3625.5	1(증)	-4.1	7.9(증)	-8.6	3.6(증)
	1:1.0	1374.4	-	906.3	-	3568.0	-	-3.8	-	-8.3	-

※ 이격거리 3m 기준, (증) : 영향인자 조건 변화시 단면력 및 변위 증가

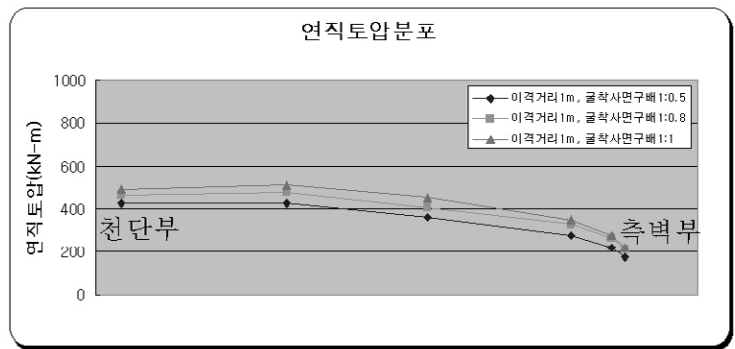
가하고, 이로 인하여 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압 등이 증가하게 되어 단면력 및 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 굴착사면의 구배가 1:1인 경우는 이격 거리가 증가함에 따라 단면력과 변위는 감소하는 상반되는 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 그림 11에서 보

이는 바와 같이 굴착사면의 구배가 1:0.5 에서 1:1.0으로 완만해짐에 따

라 굴착사면과 성토체의 접촉면에서 발휘될 수 있는 전단력의 작용 메카니즘의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 굴착사면 구배가 1:0.5 및 1:0.8인 경우 이격거리에 관계없이 굴착사면과 성토체의 접촉면에 발생하는 전단 응력이 경계요소의 전단강도를 초과하게 되며, 이로 인하여 전 성토하중이 터널에 작용되는 것으로 판단되나, 굴착사면 구배가 1:1.0인 경우 이격거리가 증가할수록 성토체와 굴착사면의 접촉면에서 전단저항이 발휘되어 어느 정도 하중을 지지하는, 즉 아칭효과가 발휘되는 것으로 판단되며, 이에 대한 세부적인 연구를 수행중이다.

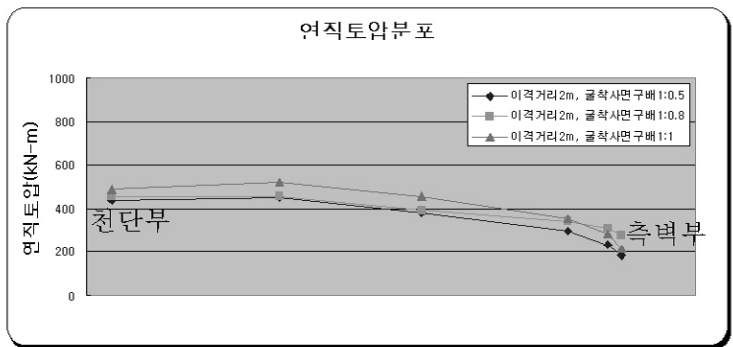
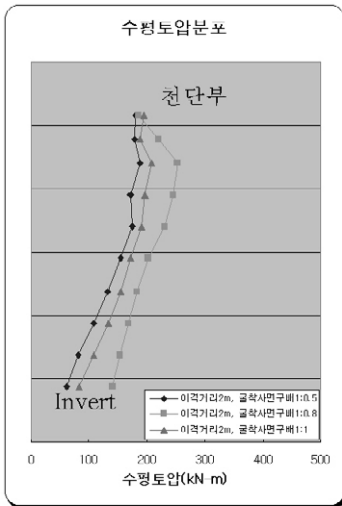


(a) 수평토압분포-이격거리 1m



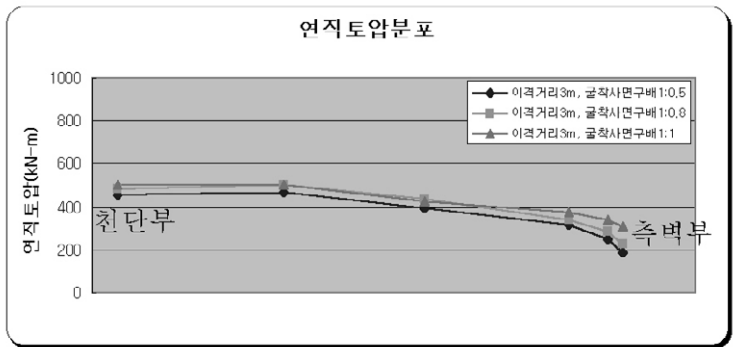
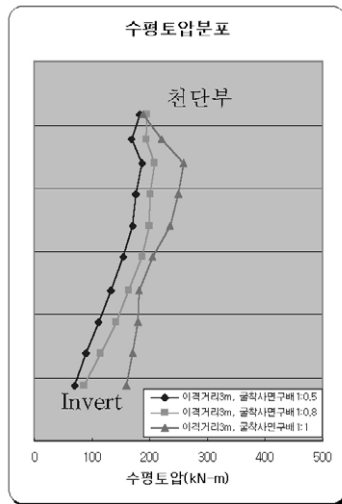
(b) 연직토압분포-이격거리 1m

그림 8. 굴착사면 구배 변화에 의한 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압 변화-이격거리 1m



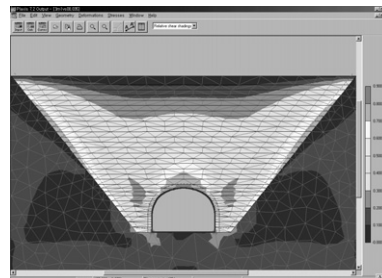
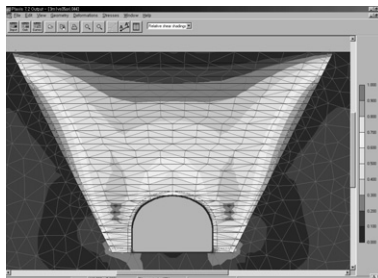
(a) 수평토압분포-이격거리 2m(左)  
 (b) 연직토압분포-이격거리 2m(上)

그림 9. 굴착사면 구배 변화에 의한 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압 변화 -이격거리 2m



(a) 수평토압분포-이격거리 3m(左)  
 (b) 연직토압분포-이격거리 3m(上)

그림 10. 굴착사면 구배 변화에 의한 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압 변화 -이격거리 3m



(a) 굴착사면 구배 1:0.5

(b) 굴착사면 구배 1:0.8

(c) 굴착사면 구배 1:1.0

그림 11. 굴착사면구배 변화에 따른 경계요소 전단력 분포

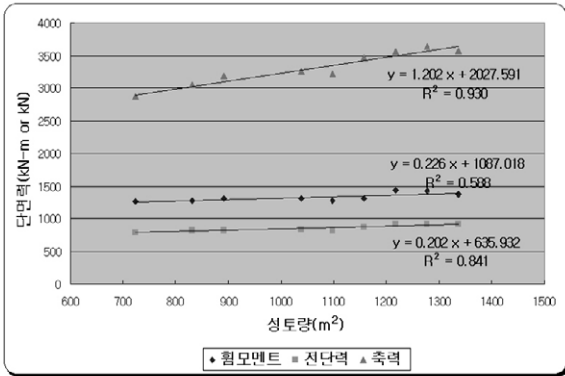


그림 12. 성토량과 단면력의 상관관계

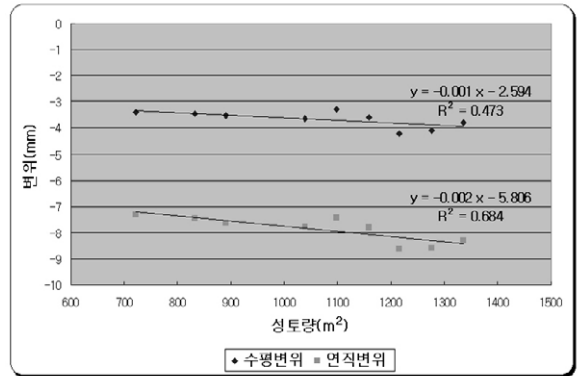


그림 13. 성토량과 변위의 상관관계

## 4.2 성토량과 최대 단면력 및 최대 변위와의 상관관계

수치해석결과 콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 및 변위는 성토량의 증가와 비례적인 관계로 변화하는 것으로 나타났다. 따라서, 성토량 변화에 따른 단면력과 변위의 변화정도 및 상관성 분석을 통하여 단면력과 변위 가운데 성토량 변화에 가장 큰 영향을 받는 요소를 파악하였다.

해석조건 변화에 따른 성토량 변화와 콘크리트 라이닝에 발생하는 최대 단면력 및 최대 변위의 상관관계를 분석하면 그림 12 및 그림 13과 같다. 성토량 증가에 따른 단면력의 변화 경향은 축력이 가장 큰 영향을 받아 변화하는 것으로 나타났으며, 연직변위가 수평변위보다 성토량 증가에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 콘크리트 라이닝에 발생하는 단면력 가운데 성토량과 회모멘트의 상관계수( $R^2$ )는 0.588, 전단력과의 상관계수( $R^2$ )는 0.841, 축력과의 상관계수는 0.93인 것으로 나타났으며, 콘크리트 라이닝에 발생하는 수평변위 및 연직변위와 성토량과의 상관계수( $R^2$ )는 각각 0.473, 0.684로 축력 및 전단력이 성토량과 비교적 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트 라이닝의 단면력 가운데 축력 및

전단력은 성토량에 큰 영향을 받으며, 회모멘트와 변위는 성토량에 의한 영향뿐만 아니라 굴착사면구배, 이격거리 등과 같은 지형적인 측면의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 굴착사면 구배, 이격거리에 의한 복개 터널 라이닝 시공시 성토에 따른 모멘트, 전단력 및 축력 등과 같은 부재력과 수평방향 변위 및 연직방향 변위 등과 같은 복개 터널의 기본거동 분석 및 영향인자분석 등을 수행하기 위하여 지반공학적 모델링 기법을 이용한 수치해석을 실시하였다. 수치해석 기법을 이용한 복개 터널 구조물의 역학적 거동 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 굴착사면 구배가 변화하는 경우 단면력 및 변위의 최대 변화율은 축력 및 수평변위에서 동일하게 19.5%, 이격거리가 변화하는 경우 단면력 및 변위의 최대 변화율은 축력과 수평변위에서 각각 10.1%, 10.5%로 나타났다. 따라서 지형적 영향인자 가운데 굴착사면

구배변화가 이격거리 변화보다 콘크리트 라이닝의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

- 2) 이격거리가 동일한 조건에서 굴착사면의 구배 변화에 따른 단면력 및 변위의 변화 관계를 연구하여 본 결과, 콘크리트 라이닝에 작용하는 수평토압 및 연직토압의 경우 이격거리가 1m와 3m인 경우에는 굴착사면 구배가 완만해짐에 따라 성토량 증가로 인하여 토압이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 이격거리가 2m인 경우 콘크리트 라이닝에 작용하는 수평토압은 굴착사면 구배가 1:0.8일 때 가장 크게 작용하여, 콘크리트 라이닝의 횡방향 거동의 구속효과로 인하여 단면력 및 변위가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 복개 터널구조물의 거동은 성토량 뿐만 아니라 굴착사면 구배 및 이격거리 등과 같은 복개 터널구조물 주변 지형적인 인자에 영향을 받는 것으로 판단된다.
- 3) 굴착사면 구배를 일정하게 고정된 조건에서 이격거리 변화에 따른 단면력 및 변위의 변화 관계를 연구하여 본 결과, 굴착사면의 구배가 1:0.5 및 1:0.8인 경우 이격거리가 증가하게 되면 성토량이 증가하고, 이로 인하여 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압 등이 증가하게 되어 단면력 및 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 굴착사면의 구배가 1:1.0인 경우는 이격거리가 증가함에 따라 단면력과 변위는 감소하는 상반되는 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 굴착사면의 구배가 1:0.5에서 1:1.0으로 경사도가 낮아짐에 따라 굴착사면과 성토체의 접촉면에서 발휘될 수 있는 전단력의 작용 메커니즘의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 굴착사면 구배가 1:1.0인 경우 이격거리가 증가할수록 성토체와 굴착사면의 접촉면에서 전단저항이 발휘되어 어느 정도 하중을 지지하는, 즉 아칭효과가 발휘되는 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구에서는 성토량과 단면력 및 변위의 상관관계

를 분석한 결과, 단면력 가운데 축력이 그리고 변위에서는 연직변위가 성토량과의 상관관계가 가장 높게 나타나, 성토량 변화에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 휨모멘트, 수평변위의 경우는 상관계수(R2)를 고려하여 볼 때 성토량에 의한 영향 뿐만 아니라 굴착사면구배, 이격거리 등과 같은 지형적인 측면의 영향을 함께 받는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 1) 김은섭, 이상덕 (1999), “지하 박스구조물에 작용하는 토압에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 15권, 제 4호, pp. 235~246.
- 2) 유건선 (1997), “실험 및 수치해석에 의한 복개 터널 주위의 지압 및 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구”, 서울대학교 박사학위논문.
- 3) 유건선 (2001), “굴착경사가 개착식터널의 구조적거동에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 17권, 제 6호, pp.245~253.
- 4) 배규진, 이규필 (2001), “복개 터널 라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구”, 대한터널협회 학술논문집, Vol. 3, No. 2, pp.13~22.
- 5) 한국건설기술연구원 (1998), “국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구”, 한국건설기술연구원, pp. 9~75.
- 6) Handy, R. L. (1985), “The Arch in Soil Arching”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 3, pp.302~318.
- 7) Kellogg, C. G. (1993), “Vertical Earth Loads on Buried Engineered Works”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 3, pp.487~506.
- 8) Kovari, K. and Tisa, A. (1982), “Computational Models for Cuts and Cover Tunnels Based on Field Measurements”, Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Edmont, Canada, pp.907~919.