

대심도 복층터널에 대한 굴착 안정성 평가 비교 연구

장남주^{1*} · 강한길² · 김기환³ · 최창림⁴

¹비회원, 삼보기술단 지반사업부 차장

²비회원, 삼보기술단 지반사업부 주임

³정회원, 삼보기술단 지반사업부 이사

⁴정회원, 삼보기술단 지반사업부 전문

A comparative study on the stability evaluation of double deck tunnel in terms of excavation

Namju Jang^{1*} · Han-gil Gang² · Kihwan Kim³ · Chang-rim Choi⁴

¹Engineer, Geotechnical Department, Sambo Engineering Co., Ltd.

²Deputy General Manager, Geotechnical Department, Sambo Engineering Co., Ltd.

³General Manager, Geotechnical Department, Sambo Engineering Co., Ltd.

⁴Managing Director, Geotechnical Department, Sambo Engineering Co., Ltd.

*Corresponding Author : Namju Jang, 8112677@naver.com

Abstract

It is necessary to construct underground in the metropolis. Road traffic has reached saturation point. The city has several underground road construction projects. In abroad, double deck tunnels are planned and constructed. It is attained a high level of underground development technology. In case the double deck tunnel (2 lane) is planed instead of the bidirectional tunnel (2 lane), excavation area is similar. But tunnel width is decreased. The reduced width can cut cost for the tunnel reinforcement. This study evaluates the stability of excavation on double deck tunnel. By the assessment of the strength-stress ratio and strength reduction method, quantitative analysis is conducted between double deck tunnel and the bidirectional tunnel.

Keywords: Double deck tunnel, Large tunnel, Strength stress ratio, Strength reduction method

초 록

주요 도심지 도로건설은 포화상태로 지하공간의 개발이 필요하며 이를 위해 지하철도와 지하도로 터널의 건설은 활발히 진행되어 왔다. 국외의 경우 지하도로터널을 2층구조로 활용하는 복층터널 시공이 이루어 졌으며 이에 따른 지하공간 개발 기술이 높은 수준에 이르고 있다. 2차로 병설터널을 2차로 복층터널로 계획하는 경우 굴착 면적은 크게

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(1)155-166(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.1.155>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 1, 2018

Revised December 10, 2018

Accepted December 14, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

차이가 나지 않으며, 터널 통과구간이 차지하는 폭을 대폭 줄일 수 있다. 이를 통해 터널 통과구간이 차지하는 폭을 대폭 감소시킬 수 있으므로 지반조건이 불량한 경우 필요한 상부 보강 비용을 절감할 수 있다. 본 연구에서는 복층터널 굴착에 따른 영향에 대해 알아봄으로써 지하공간 활용 기술을 높이고 단층터널 굴착영향과 비교를 통해 향후 복층터널 설계 및 안정성 평가에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 복층터널, 대단면터널, 강도응력비, 강도감소법

1. 서론

도심지 지상 도로건설은 포화상태에 이르렀으며, 교통혼잡을 피하기 위해 지하철도 및 지하도로의 건설은 활발히 진행 중이다. 최근 서울시는 도심지내 지상 교통량 분산을 위해 지하도로 건설을 계획, 시공하고 있다. 지하도로 건설시 도심지 용지매입 비용과 민원문제, 자연환경 훼손을 최소화하려는 지하공간 개발기술 연구가 진행되고 있다. 지하공간 개발 기술중 복층터널은 상, 하행 병설터널을 하나의 터널로 계획할 수 있어 공간 효율성을 향상시킬 수 있다. 국외의 경우 복층터널 시공 및 계획이 이루어지고 있으며 국내의 경우 시공 사례는 없으나 복층터널에 대한 연구가 진행되고 있다.

사면의 경우 대표적인 파괴양상들이 있으며 파괴면의 형상을 사전에 가정할 수가 있다. 하지만 터널의 경우는 사면의 경우와는 달리 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어려워 한계평형기법에 기초한 해석법 등을 적용하여 안전율을 구하기가 곤란하다(You et al., 2000). 이러한 이유에서 터널을 대상으로 한 수치해석은 안전율을 구하기보다는 설계검증을 위한 안정성 평가에 제한적으로 사용되어 왔다. Park et al. (2004)는 터널의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 전단강도 감소법을 이용하여 터널의 안전율을 계산하는 수치해석기법을 정립하였다

본 논문에서는 복층터널과 단층터널에 대해 지보재 설치전 강도응력비(strength stress ratio)를 이용한 국부 안전율(local factor of safety)과 지보재 설치후 전단강도 감소법(strength reduction method)을 이용한 포괄적인 안전율(global factor of safety)을 구함으로써 터널의 안전율을 정량적으로 파악하고 터널의 굴착 단면적, 편평률, 축압계수에 따른 터널 굴착 및 지보재 설치 영향을 비교 분석하였다.

2. 지하구조물 안전율과 강도감소법

2.1 터널의 안전율

안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 구조물이 붕괴될 때의 가상 지반강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 지반의 실제 강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다(Duncan, 1996). 사면의 경우 전단강도 감소기법은 실제 중력을 가한 상태에서 지반의 강도를 감소시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 강도비로서 안전율을 구한다. 이러한 원리는 보장되지 않은

사면이나 보강된 사면에 모두 적용될 수 있다(Park et al., 1999)

터널이나 사면 모두 지반구조물이며, 그 파괴가 주로 중력에 기인하므로 터널의 경우에도 동일한 개념이 적용될 수 있다. 이러한 개념의 안전율을 포괄적인 안전율(global factor of safety)라고 하며, 구조물 전체의 안정성을 대표하는 개념이다(Park et al., 2004).

한편 Fig. 1에서와 같이 수치해석에 있어, 각 요소의 응력상태는 주응력 σ_1 과 σ_3 에 의해 표현될 수 있다. 일반적으로 이 응력 상태는 $\sigma - \tau$ 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원(a)으로 그려진다. 이 원이 파괴면에 접하게 될 때 파괴가 발생하게 된다.

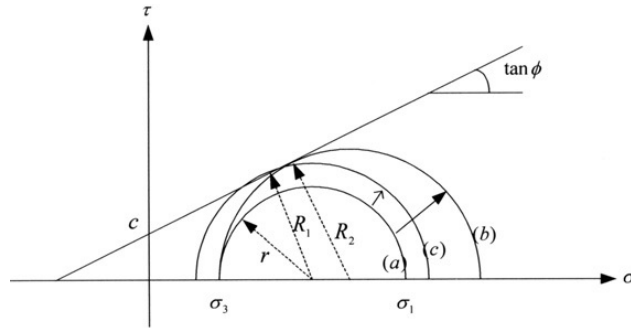


Fig. 1. Calculation of local factor of safety (You et al., 2000)

원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 파괴가 발생하려면 σ_3 는 그대로 유지하면서 원(b)와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다. 또는 원 (a)에 의해 표현된 응력 상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원 (c)와 같이 파괴면에 접할 때까지 응력원의 반지름을 증가시킴으로써 파괴에 도달할 수도 있다.

두 원의 반지름 비($F = \frac{R_2}{r}$ or $\frac{R_1}{r}$)는 주어진 응력상태에서 일종의 강도/응력비에 해당된다. 이는 해당 요소가 파괴에 근접한 정도를 나타내는 척도가 되며, 종종 국부안전율(local factor of safety)이라고도 일컬어진다. 터널의 경우 터널 주변지반에 국부적인 파괴가 발생한다 하더라도 지보재가 지지해주므로 터널 전체의 안정성에는 영향을 주지 않는 경우가 많다(Park et al., 2004).

2.2 강도 감소법

You et al. (2000)은 연약암반층에 굴착된 터널의 경우 전단강도 감소기법을 사용하여 안전율을 구하는 기법을 제시하였다. 복층터널 안정해석에서 강도감소기법을 사용하여 터널의 안정성을 정량적으로 파악할 수 있다. 강도감소기법은 실제 지반의 점착력과 내부마찰각을 시험안전율로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하여 터널의 안정성을 구하는 방법이다. 이때 시험안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치는 다음 식 (1)과 식 (2)와 같은 관계를 갖게 된다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \quad (1)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{F^{trial}} \right) \quad (2)$$

시험안전율에 의해 감소된 지반의 물성을 가진 암반에 터널을 굴착하였더니 파괴가 발생하였다면 터널의 안전율은 방금 적용되었던 시험안전율보다는 작을 것이며, 파괴가 발생하지 않았다면 시험안전율보다는 클 것이다. 따라서 터널의 파괴가 발생되기 시작하는 시점의 시험안전율을 구하면, 이것이 곧 터널의 안전율이 된다고 할 수 있다(Fig. 2).

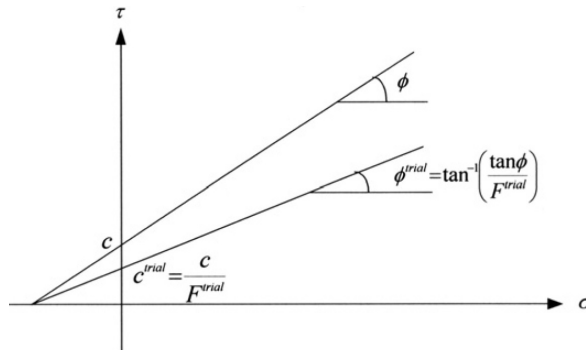


Fig. 2. Shear strength and trial shear strength (Park and You, 1998)

3. 단층터널과 복층터널

3.1 단층터널(서울 ○○○터널)

최근 시공이 진행중인 서울 ○○○터널은 사업연장 7.5 km 중 NATM 터널 구간 6.8 km의 도심지 터널이며 서울시 교통혼잡 해소를 위해 소형차 전용 도로로 계획되었다. 환기를 위해 공기정화시설 + 수직구 2개소를 계획하였으며, 환기방식은 종류식 + 집중배연방식을 적용하였다. 종점부 여의대로 및 올림픽대로 연결을 위해 분기구간 도로 선형(Fig. 3)을 계획하였으며, 분기구간에 해당하는 터널 단면(Table 1)을 계획하였다. 본선터널에서 램프터널이 분기하는 구간에 대단면 터널을 계획하였으며, 본선터널과 램프터널의 설계속도가 다르기 때문에 가감속 구간에 대한 터널 단면을 계획하였다. 분기구간의 가감속터널과 대단면 터널은 본선터널보다 단면적은 증가하고, 편평률은 더 작은 값을 가지게 된다.

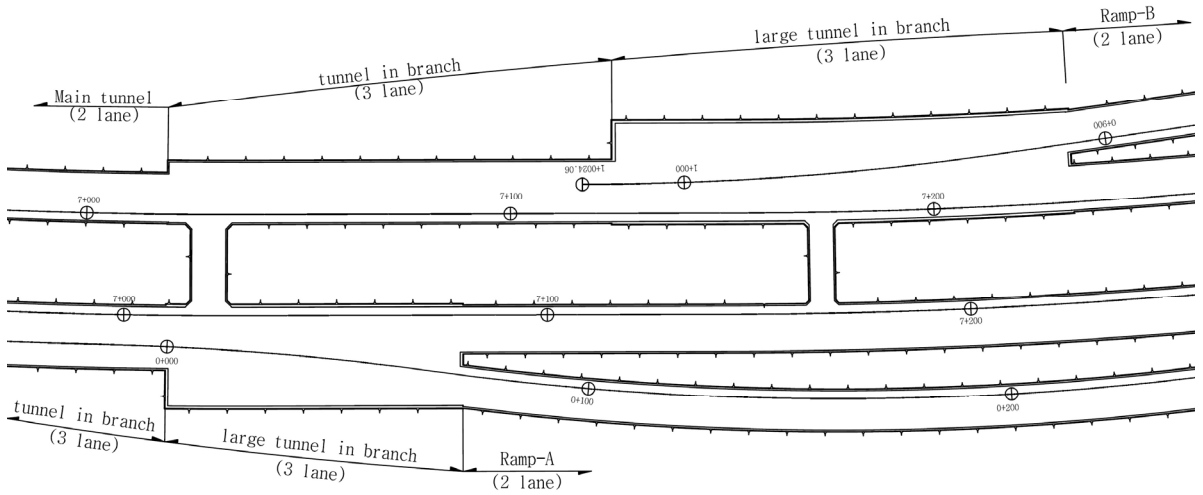


Fig. 3. Road alignment plan in branch section (Seoul ○○○ tunnel)

Table 1. Tunnel in branch section (Seoul ○○○ tunnel)

Item	Main tunnel (2 lane)	Tunnel in branch (3 lane)	Large tunnel in branch (3 lane)
Section			
Area	72.8 m ²	104.9 m ²	232.8 m ²
Flatness	0.62	0.54	0.47

3.2 복층터널

대심도에 복층터널을 도로용으로 건설하려면 본선터널에서 나뉘는 분기터널을 설계해야 한다. 그 이유는 기존의 고속도로에서 빠져나와 국도나 지방도로 이어지는 IC (나들목), 고속도로에서 다른 고속도로로 이어지는 JC (분기점)과 같은 원리이다. 대심도 복층터널 역시 도심지에 건설이 된다면 본선터널에서 도심지의 각 지역으로 갈라져 나오는 분기터널의 건설이 필요하다(Nam et al., 2017). Fig. 4는 본선터널과 램프터널이 서로 합류 또는 분기하는 경우에 대한 도로선형 계획이다. 복층터널을 계획하는 경우에도 단층터널과 마찬가지로 터널 분기 구간에 대한 단면계획을 수립하여야 한다.

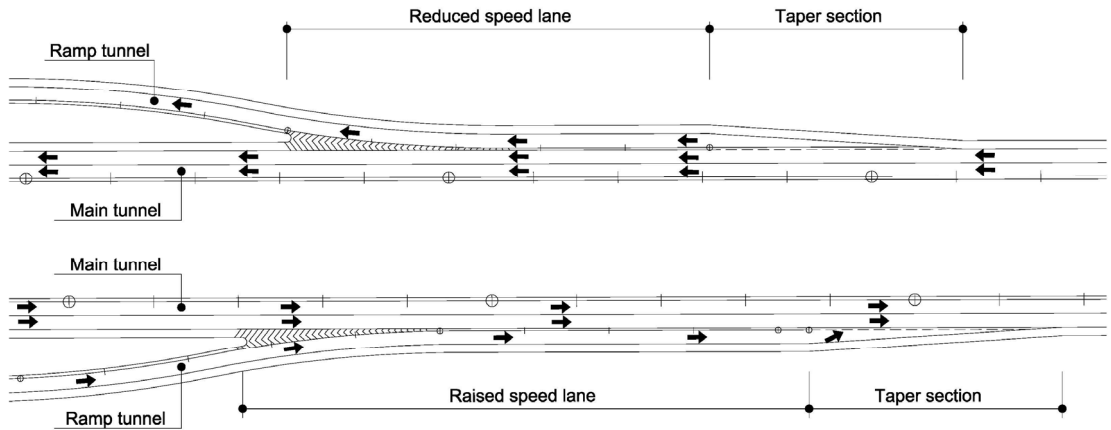


Fig. 4. Road alignment plan in branch section- reduced speed section (up), raised speed section (down)

단층 터널을 복층터널로 계획하는 경우, 단면 구성요소들에 대하여 결정하여야 한다. 단층터널 단면과 동일한 조건으로 검토하기 위해 소형차에 대한 터널을 계획하고, 이에 따라 차로폭은 3.25 m로 한다. 소형차 고속도로로 가정하여 좌측 길어깨는 0.75 m, 우측 길어깨는 2.0 m로 적용한다. 시설한계와 라이닝 여유폭은 50 mm로 적용하고, 검사원 통로는 폭 750 mm를 확보하는 것으로 한다. 터널 시설한계와 풍도슬래브 사이의 최소 높이는 600 mm로 하여 LCS표지판을 설치할 수 있는 공간을 확보한다. 단면구성요소들을 고려하여 계획된 본선구간 및 분기구간에서의 복층터널 단면은 Table 2와 같다. 복층 본선터널의 단면적은 152.2 m²으로 서울 ○○○터널의 본선단면과 비교하면 2배정도의 면적에 해당하며, 편평율은 0.89로 원형터널의 편평율 1.0에 근사한 값을 보여준다. 복층터널 또한 단층터널과 마찬가지로 분기구간의 터널은 본선터널에 비해 단면적이 크고 편평율은 작아지는 경향을 보였다.

Table 2. Double deck tunnel in branch section

Item	Main tunnel (2 lane)	Tunnel in branch (3 lane)	Large tunnel in branch (3 lane)
Section			
Area	152.2 m ²	217.1 m ²	394.9 m ²
Flatness	0.89	0.77	0.60

3.3 수치해석 검토 조건

터널 단면의 굴착영향을 검토하기 위해 다음과 같은 검토조건을 수립하였다. 단층터널과 복층터널의 형상은 마제형으로 동일하게 적용한다. 또한 교통 과밀지역인 도심지 터널에서 기존 지하구조물(지하철)의 영향을 피하기 위해 대심도 터널로 가정하여 토피고를 50 m로 고려한다. 측압계수는 0.5, 1.0, 2.0을 적용하고, 지반등급은 암반등급이 양호한 구간에 분기부 및 가감속 구간을 계획하는 것으로 고려하여 I, III등급을 적용한다. 지반등급에 따른 지보재 및 하중분담율은 동일하게 적용하여 암반등급별 지보재 영향을 비교 검토할 수 있도록 한다(Table 3, 4). 암반 등급별 물성치와 지보패턴, 하중분담율은 서울 ○○○터널의 화강암 물성치와 지보패턴 설계를 적용하였다(Table 4, 5, 6). 지보재인 슛크리트와 록볼트는 암반등급별로 Table 6과 같이 보강하였으며 단층터널과 복층터널의 비교검토를 위해 지보재를 동일하게 적용하였다.

Table 3. Analysis condition

Tunnel	Rock class	Depth	Lateral pressure coefficient
Single tunnel	I, III	50 m	0.5, 1.0, 2.0
Double deck tunnel	I, III	50 m	0.5, 1.0, 2.0

Table 4. Properties of rock mass

Rock class	Unit weight (kN/m ³)	Friction angle	Cohesion (kN/m ²)	Elastic modulus (kN/m ²)	Poisson's ratio
I	27.0	45.0	2,500	20,000	0.21
III	24.0	37.0	600	5,000	0.26

Table 5. Load relaxation factors

Support pattern	Rock class	excavation	Soft shotcrete + rock bolt	Hard shotcrete + rock bolt
P-1	I	70	15	15
P-3	III	65	15	20

Table 6. Rock support pattern

Contents	P-1	P-3
Excavation method	Full section	Full section
RMR	81~100	41~60
Q-system	40 or more	1~10
Shotcrete thickness	50 mm	80 mm
Rockbolt length	3.0 m	4.0 m
Transversal interval of Rockbolt	random	1.5 m

4. 터널의 안정성 검토

4.1 소성영역

암반등급 I 등급에서 터널 굴착으로 인해 발생하는 소성영역은 나타나지 않았으며 암반등급 III등급에서 소성영역이 발생하였다. 암반등급 III등급에서 터널 굴착으로 인한 소성영역 발생결과를 Table 7, 8에 나타냈다. 단층 터널과 복층터널에서 대단면 터널을 계획하는 경우, 터널의 단면적은 증가하고 편평율은 감소한다. 터널의 단면적은 증가하고 편평율은 감소함에 따라 소성영역은 증가하는 것으로 나타났다. $K_0 = 0.5$ 일 때와 1.0일 때 소성영역의 발생 면적이나 분포형태는 크게 다르지 않은 것으로 나타났으며, 주로 터널 측벽부에 소성영역이 발생하였다. $K_0 = 2.0$ 일 때는 소성영역의 발생면적이 크게 증가하며 터널 굴착면에서만 발생하는 것이 아니라 지반 내부에까지 소성영역이 확대 발생하였으며, 터널 천단부와 측벽부에 소성영역이 집중적으로 발달되었다. 이는 단층터널과 복층터널 모두에서 동일한 결과를 보여주었다.

Table 7. Plastic failure zone in single tunnel

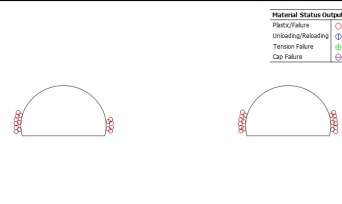
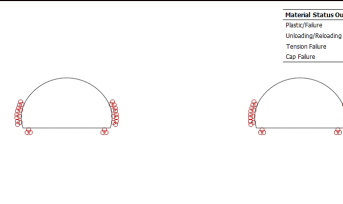
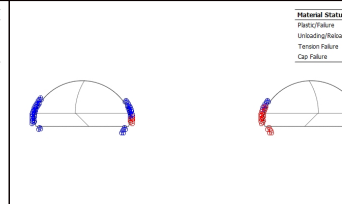
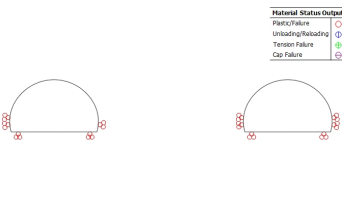
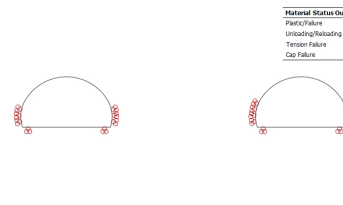
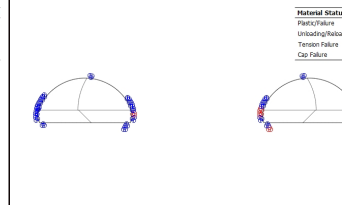
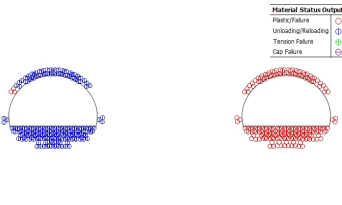
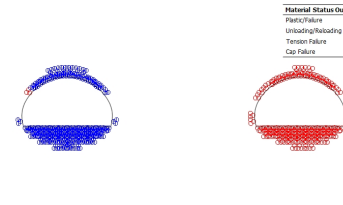
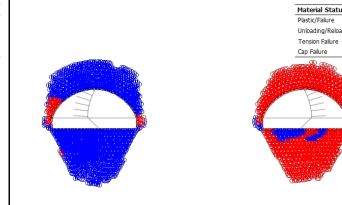
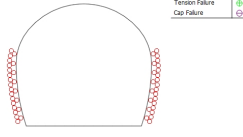
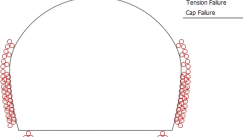
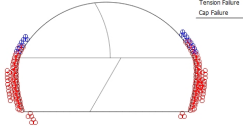
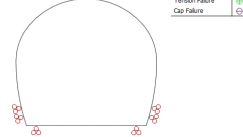
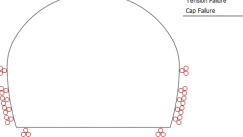
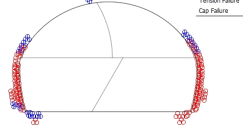
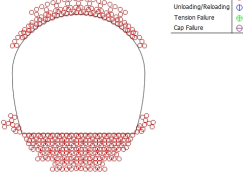
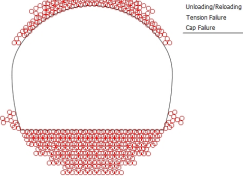
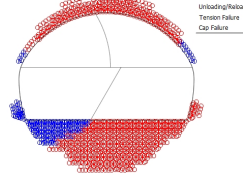
Item	Main tunnel (2 lane)	Tunnel in branch (3 lane)	Large tunnel in branch (3 lane)
$K_0 = 0.5$			
$K_0 = 1.0$			
$K_0 = 2.0$			
Area	72.8 m ²	104.9 m ²	232.8 m ²
Flatness	0.62	0.54	0.47

Table 8. Plastic failure zone in double deck tunnel

Item	Main tunnel (2 lane)	Tunnel in branch (3 lane)	Large tunnel in branch (3 lane)
$K_0 = 0.5$	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>
$K_0 = 1.0$	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>
$K_0 = 2.0$	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>	 <p>Material Status Output Plastic Failure <input type="checkbox"/> Unloading/Reloading <input type="checkbox"/> Tension Failure <input type="checkbox"/> Cap Failure <input type="checkbox"/></p>
Area	152.2 m ²	217.1 m ²	394.9 m ²
Flatness	0.89	0.77	0.60

4.2 강도-응력비(국부 안전율)

터널의 국부 안전율은 터널 굴착시 주변 지반에 발생하는 응력 변화에 의한 강도응력비 검토를 통해 파악할 수 있다. 터널 굴착 및 지보재 설치과정에서 터널 주변지반을 지보재가 지지해 주므로 터널 전체의 안정성에는 문제가 없지만 지보재를 설치하기 전에 해당하는 무지보 상태에서는 굴착과정에서 발생할 수 있는 지반의 취약지점, 국부적 파괴 발생 가능성을 예측 할 수 있다.

터널별 무지보 상태에서 국부안전율을 Table 9에 나타내었다. 단층터널의 국부 안전율은 암반등급 I 등급에서 1.50~2.04의 범위를 보여주었으며 단면의 크기가 클수록 안전율은 감소하였다. $K_0 = 1.0$ 일 때 안전율이 가장 큰 값을 보여주어 가장 안전한 것으로 나타났으며, $K_0 = 0.5$ 일 때 안전율이 감소하였으나 무시할 정도로 작은 수준이고, $K_0 = 2.0$ 에서는 안전율은 0.5일 때 감소한 양보다 더 크게 감소하였다. 이는 소성영역이 $K_0 = 2.0$ 에서 크게 발생한 것과 같은 경향을 보여준다. 암반등급 III등급에서 안전율은 1.00~1.08의 값을 보여주었다. 터널 굴착으로 인해 모어원이 파괴포락선에 도달하여 부분적 파괴가 발생할 수 있음을 보여준다.

Table 9. Local factor of safety in single tunnel and double deck tunnel

Tunnel		Main tunnel (2 lane)		Tunnel in branch (3 lane)		Large tunnel in branch (3 lane)	
Support pattern		P-1	P-3	P-1	P-3	P-1	P-3
Single tunnel	$K_0 = 0.5$	2.04	1.03	1.93	1.00	1.63	1.00
	$K_0 = 1.0$	2.15	1.08	2.00	1.04	1.66	1.00
	$K_0 = 2.0$	1.60	1.00	1.57	1.00	1.50	1.00
Double deck tunnel	$K_0 = 0.5$	2.39	1.19	2.20	1.12	1.91	1.00
	$K_0 = 1.0$	2.36	1.24	2.24	1.17	1.94	1.00
	$K_0 = 2.0$	1.56	1.00	1.53	1.00	1.43	1.00

복층터널의 국부 안전율은 암반등급 I 등급에서 1.43~2.39, 암반등급 III 등급에서 1.00~1.24의 범위를 보여주었으며 K_0 에 따른 안전율은 단층터널과 동일한 경향을 보여주었다. 복층터널의 단면적은 단층터널의 2배정도 크기 때문에 안전율을 더 작은 값을 가져야 한다고 생각될 수 있다. 그러나 $K_0 = 0.5, 1.0$ 에서 복층터널의 안전율이 단층터널보다 더 양호한 결과를 보여주었으며, $K_0 = 2.0$ 일 때 안전율은 불리한 결과를 보여주지만 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 복층터널은 단층터널에 비해 단면적이 2배정도 크지만 편평율은 1.0에 더 가까운 형상을 가지고 있기 때문으로 판단된다.

지보패턴 P-3을 적용한 암반등급 III에서 국부안전율은 1.00에 근사한 값을 보여주었다. 이는 터널 주변의 암반 중 일부분이 소성영역을 넘어 파괴에 이르렀다는 점과 그 주변 지반은 소성영역에 도달하였다는 것을 알 수 있다. 만약 굴착후 지보재를 설치하지 않는다면 터널은 굴착 안전성을 확보하지 못할 수도 있다. 그러나 실제 현장의 암반은 무수한 절리를 가지고 있는 불연속체로서 본 논문에서 구한 국부안전율은 연속체역학으로 구한 결과라는 한계를 가지고 있으며, 현장 시공에서는 굴착후 지보재를 바로 설치함으로써 굴착 안전을 확보할 수 있다. 다만 국부안전율이 1.00에 근사한 경우에 대해서는 굴착후 지보재를 설치하는 과정에서 굴착안전에 대한 주의가 필요한 것으로 생각할 수 있으며 가능한 빠른 시간에 지보재를 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.3 포괄적인 안전율(global factor of safety)

포괄적인 안전율은 강도감소법을 이용하여 터널 주변지반을 지지해 주는 지보재의 파괴를 고려하는 정량적인 방법이다. 무지보시 지반의 국부안전율은 지보재를 설치하지 않기 때문에 안전율이 작은 경우, 대처가 불가능 하지만 지보재 설치를 통한 지보 안전율은 안전율이 작은 경우, 지보재를 증가시켜서 목표 안전율을 충족할 수 있으며, 안전율이 예상보다 큰 경우 지보재 조절을 통해 경제적인 터널을 계획할 수 있다. 단층터널과 복층터널의 지보재 안정성을 비교하기 위해 단층터널과 복층터널의 지보재를 동일하게 적용하였으며, Table 10에 단층터널과 복층터널 지보재의 안전율을 나타내었다.

Table 10. Global factor of safety in single tunnel and double deck tunnel

Tunnel		Main tunnel (2 lane)		Tunnel in branch (3 lane)		Large tunnel in branch (3 lane)	
Support pattern		P-1	P-3	P-1	P-3	P-1	P-3
Single tunnel	$K_0 = 0.5$	8.50	2.60	7.60	2.40	5.90	2.10
	$K_0 = 1.0$	8.40	2.80	7.60	2.80	6.30	1.80
	$K_0 = 2.0$	7.00	2.00	6.60	2.00	5.80	1.40
Double deck tunnel	$K_0 = 0.5$	10.00	3.10	8.80	2.90	7.30	2.10
	$K_0 = 1.0$	9.80	2.90	8.70	2.80	7.30	2.10
	$K_0 = 2.0$	7.00	1.80	6.50	1.70	6.30	1.10

단층터널의 지보재 안전율은 암반등급 I 등급에서 5.80~8.50의 범위를 보여주었으며 단면의 크기가 클수록 안전율은 감소하였다. $K_0 = 1.0, 0.5$ 일 때 안전율의 차이는 크지 않으며, $K_0 = 2.0$ 에서 안전율은 가장 작은 값을 보여주었다. 암반등급 III등급에서 안전율은 1.40~2.80의 값을 보여주었다. 암반등급 I 등급에서와 같이 $K_0 = 1.0, 0.5$ 일 때 안전율의 차이는 크지 않으며, $K_0 = 2.0$ 에서 안전율은 가장 작은 값을 보여주었다.

복층터널의 지보재 안전율은 암반등급 I 등급에서 6.3~10.0, 암반등급 III등급에서 1.10~3.10의 범위를 보여주었으며 K_0 에 따른 안전율은 단층터널과 동일한 경향을 보여주었다. 복층터널의 단면적은 단층터널의 2배정도 크기 때문에 안전율은 더 작은 값을 가져야 한다고 생각될 수 있다. 그러나 $K_0 = 0.5, 1.0$ 에서 복층터널의 안전율이 단층터널보다 더 양호한 결과를 보여주었으며, 2.0일 때 안전율은 불리한 결과를 보여주지만 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 복층터널은 단층터널에 비해 단면적이 2배정도 크지만 편평율은 1.0에 더 가까운 형상을 가지고 있기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 대심도 양호한 암반지반의 단층터널과 복층터널 굴착시 안전율(강도응력비)과 지보재 설치후의 안전율(강도감소법)을 정량적으로 파악함으로써 단면의 굴착면적, 편평율, 측압계수의 영향을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 터널의 단면적은 증가하고 편평율은 감소함에 따라 소성영역은 증가하는 것으로 나타났다. $K_0 = 0.5$ 일 때와 1.0일 때 소성영역의 발생 면적이나 분포형태는 크게 다르지 않은 것으로 나타났으며, 주로 터널 측벽부에 소성영역이 발생하였다. $K_0 = 2.0$ 일 때는 소성영역의 발생면적이 크게 증가하며 터널 굴착면에서만 발생하는 것이 아니라 지반 내부에까지 소성영역이 확대 발생하였으며, 터널 천단부와 측벽부에 소성영역이 집중적으로 발달되었다. 이는 단층터널과 복층터널 모두에서 동일한 결과를 보여주었다.
2. 복층터널의 단면적은 단층터널의 2배정도 크기 때문에 안전율은 더 작은 값을 가져야 한다고 생각될 수 있으

나 $K_0 = 0.5, 1.0$ 에서 복층터널의 국부안전율(강도-응력비)이 단층터널보다 더 양호한 결과를 보여주었으며, $K_0 = 2.0$ 일 때 안전율(강도-응력비)은 불리한 결과를 보여주지만 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 복층터널의 편평율이 단층터널에 비해 1.0에 더 가까운 형상을 가지고 있기 때문으로 판단된다.

3. 지보패턴 P-3을 적용한 암반등급 III에서 국부안전율은 1.00에 근사한 값을 보여주었다. 이는 터널 주변의 암반중 일부분이 소성영역을 넘어 파괴에 이르렀다는 점과 그 주변 지반은 소성영역에 도달하였다는 것을 알 수 있다. 만약 굴착후 지보재를 설치하지 않는다면 터널은 굴착 안전성을 확보하지 못할 수도 있다. 그러나 실제 현장의 암반은 무수한 절리를 가지고 있는 불연속체로서 본 논문에서 구한 국부안전율은 연속체역학으로 구한 결과라는 한계를 가지고 있으며, 현장 시공에서는 굴착후 지보재를 바로 설치함으로써 굴착 안전을 확보할 수 있다. 다만 국부안전율이 1.00에 근사한 경우에 대해서는 굴착후 지보재를 설치하는 과정에서 굴착안전에 대한 주의가 필요한 것으로 생각할 수 있으며 가능한 빠른 시간에 지보재를 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
4. 지보재 안전율은 국부안전율에서와 같이 $K_0 = 0.5, 1.0$ 에서 복층터널의 안전율이 단층터널보다 더 양호한 결과를 보여주었으며, 2.0일 때 안전율은 불리한 결과를 보여주지만 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계기술 및 시공기술개발(16SCIP-B089409-03)’ 연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Duncan, J.M. (1996), “State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 7, pp. 577-596.
2. Nam, K.M., Choi, M.K., Kim, J.J., Yoo, H.K. (2017), “Stability analysis of an existing utility tunnel due to the excavation of a divergence tunnel emerging from double-deck tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 2, pp. 231-248.
3. Park, J.W., Park, Y.J., You, K.H., Lee, S.D. (2004), “A study on the assessment of safety factor tunnels”, Journal of Korea Society for Rock Mechanics, Vol. 14, No. 5, pp. 327-338.
4. Park, Y.J., Chae, Y.S., You, K.H., Paik, Y.S. (1999), “Slope stability analysis by slice method and finite difference method -A comparative study-”, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 15, No. 6, pp. 263-272.
5. Park, Y.J., You, K.H. (1998), “Stability analysis for jointed rock slope using ubiquitous joint model”, Journal of the Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 8, No. 4, pp. 287-295.
6. You, K.H., Park, Y.J., Bae, G.J. (2000), “An assessment of safety factor for tunnels excavated in a weak rock layer”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 2, No. 3, pp. 47-57.