

수치해석에 의한 연약지반 터널의 바닥부 곡률의 영향 분석

유광호^{1*} · 김강산²

¹정회원, 수원대학교 건설환경공학과 교수

²학생회원, 수원대학교 건설환경공학과 석사과정

The effect of curvature at the bottom of a soft ground tunnel by numerical analysis

Kwangho You^{1*} · Kangsan Kim²

¹Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

²Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

*Corresponding Author : Kwangho You, khyou@suwon.ac.kr

Abstract

Due to the acceleration of road construction, the number and extension of tunnels are increasing every year. A lot of research has been done on the collapse of tunnels, but research on the invert heaving is insufficient. Therefore, in this study, a sensitivity analysis was performed using a geotechnical general-purpose program to analyze the effect of the invert curvature of a tunnel excavated on the soft ground. As a result, it was quantitatively confirmed that the stability of a tunnel was increased as the curvature of the tunnel invert was increased so that the safety factor was calculated to be large regardless of the ground conditions and the thickness of the support. In addition, it was confirmed that the stability of the tunnel was increased by reducing the convergence of the tunnel and the maximum bending stress supported by shotcrete. Therefore, when a tunnel is excavated on soft ground, it is believed that applying a curvature to the invert will increase the stability of the tunnel.

Keywords: Tunnel invert, Soft ground, Factor of safety, Curvature, Finite difference method

초 록

도로건설의 가속화로 인해 매년 터널의 개소와 터널 연장이 증가하는 추세이다. 터널의 붕락에 관련된 연구는 많이 진행됐으나 바닥부 융기와 관련된 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연약지반에서 터널의 바닥부 곡률의 영향을 분석하고자 지반범용해석 프로그램을 이용하여 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 터널의 바닥부 곡률이 커질수록 지반조건 및 지보재 두께와 관계없이 안전율이 크게 산출되어 터널의 안정성이 증가됨을 정량적으로 확인하였다. 또한, 터널의 내공변위 및 숏크리트가 받는 최대

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
23(2)107-118(2021)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.2.107>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received February 1, 2021

Revised February 24, 2021

Accepted February 24, 2021



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 © 2021, Korean Tunnelling and Underground Space Association

휨응력도 감소하여 터널의 안정성이 증대됨을 확인하였다. 따라서 연약지반에서 터널을 굴착할 경우 바닥부에 곡률을 적용하는 것이 터널의 안정성을 증대시킬 것으로 판단된다.

주요어: 터널 바닥부, 연약지반, 안전율, 곡률, 유한차분법

1. 서론

2019년 12월 기준으로 10년 전과 비교하였을 때 매년 7.6%씩 터널의 개소가 증가하고 터널 연장이 1,102 km 이상 늘어나 우리나라의 도로건설이 가속화되고 있는 추세이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020). 하지만 터널 시공 건수가 늘고 연장이 길어지는 만큼 터널의 붕락 또는 용기사고 등도 증가할 것으로 판단된다.

일반적으로 터널이 굴착되면 지반의 응력변화 및 변형이 발생하게 된다. 이러한 지반거동은 지반조건, 굴착방법, 시공수준 등에 따라 달라지는데, 지반조건에 맞는 적절한 굴착방법과 시공수준을 적용하지 않는 경우 터널의 안정에 나쁜 영향을 미치게 된다. 일반적으로 터널 천단부의 지반이 연약하거나 지하수의 영향을 받는 경우는 붕락 사고가 발생할 가능성이 높으며, 팽창성 점토지반의 경우 굴착에 의한 응력변화로 인해 바닥부(invert) 용기가 발생할 가능성이 높다. 한편 터널 시공 시 발생하는 사고는 붕괴 혹은 붕락에 의한 경우가 많으므로 이에 대한 많은 연구가 수행되고 효율적인 대책 방안이 마련되어있으나, 용기사고는 상대적으로 적게 발생하여 이에 대한 연구와 대책 방안이 미흡한 실정이다.

Lee (2018)는 용기문제에 대처하고자 용기가 발생하는 원인 및 대책을 구상하고 이와 관련된 기술적인 내용을 제공하고자 하였다. 국내 터널의 지하수의 꾸준한 유입 또는 지반구속의 해방으로 인한 스퀴징(squeezing)이 용기가 발생한 주된 원인으로 추정하였다. 또한, 과도한 용기가 발생할 시 보수대책을 강구하기가 쉽지 않으므로 용기가 예상되는 구간에서 미리 충분한 보강설계를 하는 것이 합리적이라 판단하였다.

한편, Cho (2020)는 실제 연약지반에 시공 중인 도로 터널과 공용 중인 도로터널의 포장부에서 발생한 용기 사례를 대상으로 조사하여 바닥부의 용기 구간에 대한 거동특성을 분석하고 합리적인 보강방안을 제시하고자 하였다. 또한, FLAC 2D 5.0 (Itasca Consulting Group, Inc., 2005) 프로그램을 이용하여 터널 바닥부 중앙에서의 최대 깊이 즉, 바닥부 깊이를 0, 50, 100 cm로 달리하여 5등급 응회암 변질대 및 슛크리트 두께 25 cm의 조건에서 터널의 내공변위와 안전율을 분석하였다. 그 결과, 바닥부 깊이가 깊어질수록 터널의 내공변위가 감소하고 안전율은 상승하여 터널의 안정성이 확보되는 결과를 도출했다. 하지만 1가지 지반조건에 대해 연구가 수행되어 지반조건에 대한 영향을 다각적으로 분석해야 할 필요가 있다고 판단되었다.

따라서 본 연구는 지반 범용 유한 차분해석에 근거한 FLAC 2D 5.0 프로그램을 이용하여 터널 바닥부 곡률의 보강효과에 대해 민감도분석을 수행하여 터널의 안정성을 평가하고자 하였다. 대상 터널은 일반적인 왕복 2차선 도로터널로 터널의 폭은 12.8 m 높이는 터널 바닥부가 수평한 경우와 곡률을 넣은 경우로 최소 약 8 m에서 최대

약 9 m의 높이로 모델링하였다. 바닥부 중앙의 최대 깊이는 0, 25, 50, 75, 100 cm로 세분화하였고, 지반조건은 응회암 변질대 3, 4, 5등급을 대상으로 하였으며, 지보재 두께는 25 및 40 cm로 달리하였다. 즉, 30가지 경우에 대한 터널의 안정성을 평가하여 바닥부 곡률의 영향을 세부적으로 분석하고자 하였다.

2. 전단강도 감소기법을 이용한 터널의 안전율 산정

Zienkiewicz et al. (1975), Naylor (1982), Donald and Giam (1988) 등에 의해 사용된 전단강도 감소기법은 터널의 안전율을 산정하고자 Park and You (1998), You et al. (2000, 2001, 2005, 2007), You and Park (2002), Park et al. (2004)이 사용하였다. 터널 안정해석에서 전단강도 감소기법을 적용하고자 식 (1) 및 식 (2)의 관계식을 이용하여 일련의 해석을 반복 수행하도록 하였다.

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

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

여기서, F^{trial} 는 시험안전율, c 는 실제 지반의 점착력, c^{trial} 는 시험안전율에 의해 감소된 지반의 점착력, ϕ 는 실제 지반의 내부마찰각, ϕ^{trial} 는 시험안전율에 의해 감소된 지반의 내부마찰각이다.

식 (1) 및 식 (2)로부터 시험안전율이 1보다 크다면 해석에 적용된 지반물성치는 원래의 지반물성치보다 감소된 값을 얻게 됨을 알 수 있다. 시험안전율을 해석에 적용 시 안정하다면 터널은 시험안전율보다 큰 안전율을 가지게 된다. 반면, 시험안전율을 적용 시 파괴가 발생한다면 실제 안전율은 이보다 작은 값을 갖는다. 따라서 반분법(bisection method) 등을 적용하여 일련의 해석을 수행함으로써 터널이 파괴되기 시작하는 시점의 시험안전율을 구하여 최종적으로 터널의 안전율을 구할 수 있다.

3. 바닥부(invert) 곡률 효과

일반적으로 지반이 불량한 조건에서 그림 Fig. 1(a)와 같이 터널 바닥부가 수평하게 설치될 경우, 굴착 시 큰 천단침하 및 내공변위가 발생할 가능성이 있다. 또한, 터널 바닥부에도 과도한 변형 큰 이완응력이 발생하여 터널의 안정성에 문제가 생길 수 있다. 이를 방지하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 터널 바닥부를 시공조건에 맞게 일정한 곡률을 갖는 곡선으로 굴착하고 숏크리트를 타설한다. 즉 바닥부는 중앙부에서 깊이가 최대가 되고, 모서리부에서 0이 되며 그 사이에서는 깊이가 점차적으로 작아지는 특징을 갖는다. 또한 터널을 조기에 링(ring) 폐합을 시킴으로써 터널의 변형과 주변 지반의 응력이 집중되는 것을 방지하여 터널의 안정성을 증대시키는 것이 바닥부 곡률 설치의 보강개념이다.



Fig. 1. Tunnel invert with a curvature

4. 유한차분법에 의한 수치해석 모델링

본 연구에서는 연약지반에서 터널 바닥부 곡률의 영향을 분석하기 위해 FLAC 2D 5.0 (Itasca Consulting Group, Inc., 2005)을 이용하여 일반적인 왕복 2차선 도로터널을 대상으로 Fig. 2와 같이 터널의 대칭성을 고려하여 반단면(half-section)으로 모델링을 하였다. 또한, 터널 바닥부의 곡률 효과를 보기 위해 바닥부 중앙에서부터 최대 깊이를 각각 터널 상·하부에 0, 25, 50, 75, 100 cm로 설치하였다. 전체 지반영역은 단일층으로 구성된 응회암 변질대로 가정하여 적용하였다. 터널의 토피고는 약 80 m로 구성하였으나, 해석의 속도 향상 및 메모리 사용량을 줄이기 위해 약 60 m 높이에 해당하는 토피고를 상재하중으로 처리하고 나머지 지반만을 요소망에 포함시켜 모델링하였다.

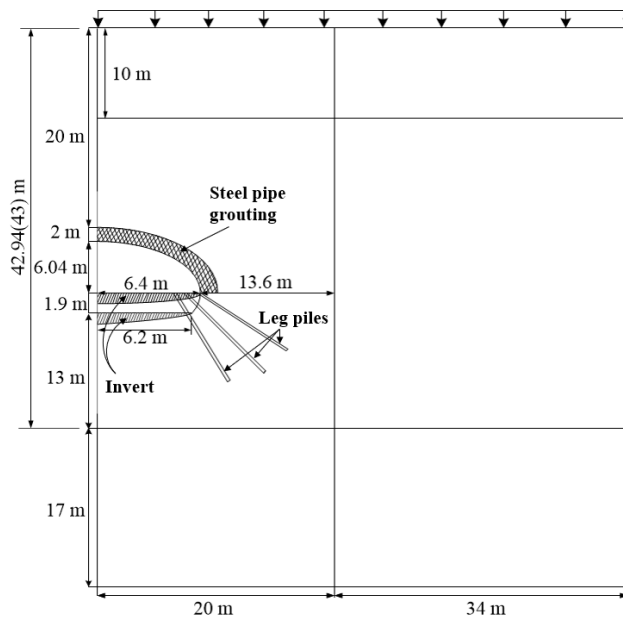


Fig. 2. The generals of analysis section

해석영역은 터널 측벽에서부터 우측으로 약 48 m, 터널 바닥부(invert)에서부터 아래로 약 30 m만큼으로 설정하고 해석경계는 좌·우측 경계는 수평변위, 하단 경계는 수직변위를 구속하였다. 또한, 터널과 인접한 부분의 요소망 크기를 0.2 m로 작게 적용하고, 해석속도의 향상을 위해 요소망의 크기를 외곽으로 갈수록 점진적으로 증가시켰다. 한편, 지반보강을 위해 터널 상부에서 두께 2 m 정도의 강관 그라우팅(steel pipe grouting)과 상부 반단면 굴착 후 하부 굴착 전에 레그파일(leg pile) 보강을 적용하였다. 하지만, 해석상에서 강관 그라우팅 파이프를 개별적으로 각각 모사하기가 어려우므로 식 (3)의 지반과 강관의 등가탄성계수를 구하여 보강영역에 적용하였다.

$$E_0 = \frac{E_P A_P + E_S A_S}{A_P + A_S} \quad (3)$$

여기서, E_0 는 등가탄성계수, E_S 는 지반의 탄성계수(GPa), E_P 는 강관의 탄성계수(GPa), A_S 는 지반의 단면적(m^2), A_P 는 강관의 단면적(m^2)이다.

연약한 지반을 모델링 하고자 Table 1과 같이 Cho (2020)의 물성치를 참고하고 응회암 변질대(tuff deterioration) 3, 4, 5 지반의 물성치를 가정하였으며, 축압계수(K_0)는 1.0을 적용하였다. 일반적으로 지반 3, 4등급에서는 바닥부 곡률, 지보재, 레그파일이 적용되지 않으나 지반조건별 바닥부 곡률 효과를 중점적으로 보기 위해 3, 4등급의

Table 1. Ground properties

Ground type	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio
Tuff deterioration-3	20.0	35	33	120	0.31
Tuff deterioration-4		30	31	100	
Tuff deterioration-5		25	29	90	

Table 2. Properties of supports and supporting materials

Type	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Unit weight (kN/m ³)	Area (m ²)	C.T.C (m)	Remark
Shot-crete	Soft	0.3	24	0.25, 0.4	-	-
	Hard			15	0.25, 0.4	
Steel rib	210	0.3	78	6.353×10^{-3}	0.8	SS400, H-200
				1.198×10^{-2}		SS400, H-300
Leg pile	0.905	0.31	20	1.2	-	c: 68 kN/m ² ϕ : 30°
Steel pipe	34	0.3	32	0.453	-	T.D.-3: $E_0 = 956.5$ MPa T.D.-4: $E_0 = 937.0$ MPa T.D.-5: $E_0 = 917.5$ MPa

경우도 지보재 및 보강재를 설치하였다. 이때, 지보재 및 보강재의 물성치는 Table 2와 같다. 단, 슛크리트 및 강지보는 보요소로 각각 고려하기보다는 함께 거동하는 것으로 가정하였다. 참고로 지반등급별로 해석에 적용된 강관 그라우팅의 등가탄성계수(E_0)는 비고에 서술하였다. 한편 레그파일은 탄성거동을 하는 지반요소로 가정하고 등가물성치는 적용하지 않았다.

Table 3은 지보재인 슛크리트와 강지보재의 물성치를 근거로 식 (3)에 의해 계산된 등가 탄성계수를 정리한 것이다. 특히, 슛크리트는 연성과 경성 상태로 구분하고, 두께가 0.4 m 경우는 보강 효과를 높이기 위해 H-300 규격의 강지보재를 적용하였다. 또한, 등가 물성값 중에서 단면 2차 모멘트는 강지보재의 값이 상대적으로 매우 작으므로 슛크리트의 값을 그대로 적용하였다.

Table 3. Equivalent properties of supports

Type		Area (m ²)	Moment of inertia (m ⁴)	Elastic modulus (GPa)	Equivalent elastic modulus (GPa)
Shotcrete	Soft	0.25	1.302×10^{-3}	5	10.08
		0.4	5.333×10^{-3}		19.83
	Hard	0.25	1.302×10^{-3}	15	10.96
		0.4	5.333×10^{-3}		20.67
Steel rib	H-200	6.353×10^{-3}	4.72×10^{-5}	210	-
	H-300	1.198×10^{-2}	6.75×10^{-5}		

5. 수치해석 결과 및 분석

본 연구에서는 터널의 바닥부 곡률이 터널의 안정성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 전단강도 감소기법을 활용하여 터널의 안전율을 산출하고 안정성을 정량적으로 평가하였다. 또한, 바닥부 곡률의 크기별로 지표면, 천단부, 바닥부, 측벽부의 내공면위를 비교·분석하고 지보재의 휨응력과 허용휨응력을 초과하여 파괴가 발생한 구역을 검토하여 터널의 안정성을 비교·검토하였다.

5.1 터널의 안정성 분석

터널의 바닥부 곡률이 커질수록 즉, 터널의 바닥부(invert) 중앙 깊이가 깊어질수록 터널의 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 보기 위해 지반조건, 지보재 두께 및 바닥부 중앙 깊이별 안전율을 산출하여 Table 4에 정리하였다. 또한, 바닥부 곡률별로 산출된 안전율의 경향을 효과적으로 분석하고자 Fig. 3에 도시하였다.

전반적으로 조건에 상관없이 바닥부 곡률이 커질수록 터널의 안전율이 약 4~14% 증가하는 경향이 나타나 바닥부 곡률에 의한 보강 효과를 확인하였다. 한편, 모든 지반조건에서 바닥부 중앙 깊이가 75 cm에서 100 cm로 증가할 때 지보재 두께가 25 cm의 경우 나머지 바닥부 깊이 조건에 비해 안전율이 4%로 다소 적게 증가하는 경향이

나타났다. 이는 바닥부에 곡률을 추가하여 작용하는 응력의 크기가 커지게 되어 지보재의 강도에 근접했기 때문으로 판단된다.

Table 4. Factor of safety by depth of invert

Ground type	Shot. thickness (cm)	Depth of invert (cm)				
		0	25	50	75	100
T.D-3	25	1.47	1.61	1.65	1.73	1.78
	40	1.73	1.88	1.97	2.05	2.13
T.D-4	25	1.25	1.35	1.43	1.53	1.57
	40	1.51	1.65	1.75	1.83	1.91
T.D-5	25	1.07	1.18	1.25	1.37	1.41
	40	1.33	1.47	1.55	1.65	1.71

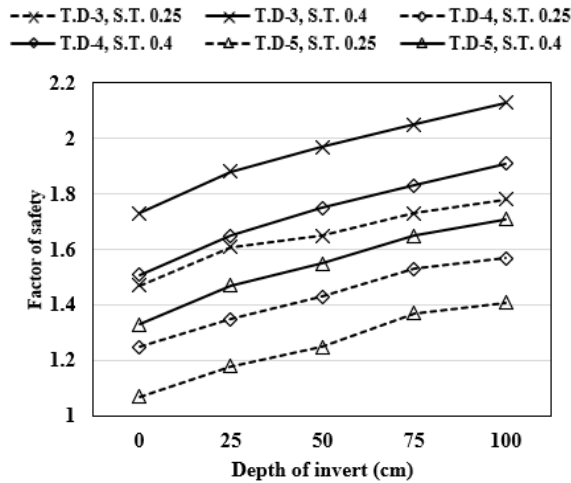


Fig. 3. Factor of safety by depth of invert

5.2 터널의 내공변위 비교·분석

터널의 바닥부(invert) 곡률이 터널의 내공변위에 미치는 영향을 분석하기 위해 바닥부 깊이별로 수치해석을 수행하고 터널의 천단부 및 바닥부의 수직변위를 Table 5에 도시하고 이를 Fig. 4와 같이 그래프로 나타내었다. 이때 지반 및 지보재 조건은 각각 응회암 변질대 3등급 및 두께 25 cm로 고정하였다. Table 5에서 괄호 속 백분율은 수평한 바닥부에서 곡률이 커질 때 변화된 비율이며 (-)는 감소를 나타낸다. 또한, 터널의 천단 및 바닥부 변위는 터널 내부방향으로 발생한 변위를 (+), 외부 방향으로 발생한 변위를 (-)로 나타내었다.

Table 5. Depth of invert and tunnel displacement by excavation step (T.D.-3, S.T. = 25 cm) (unit: cm)

Measuring point	Excavation step Depth of invert (cm)	Upper bench			Lower bench		
		No support	Soft shotcrete	Hard shotcrete	No support	Soft shotcrete	Hard shotcrete
Crown	0	3.00	4.99	7.96	8.72	8.68	8.72
	25	3.07 (2.3%)	4.91 (-1.6%)	7.88 (-1.0%)	8.53 (-2.2%)	8.51 (-2.0%)	8.42 (-3.4%)
	50	3.02 (0.6%)	4.93 (-1.3%)	7.38 (-7.3%)	7.87 (-9.7%)	7.97 (-8.3%)	7.94 (-9.0%)
	75	2.96 (-1.2%)	4.97 (-0.4%)	7.12 (-10.6%)	7.66 (-12.2%)	7.78 (-10.4%)	7.70 (-11.7%)
	100	2.95 (-1.8%)	4.99 (-0.1%)	6.91 (-13.2%)	7.27 (-16.7%)	7.40 (-14.8%)	7.32 (-16.1%)
Invert	0	5.64	7.65	23.12	30.03	32.61	39.90
	25	5.34 (-5.4%)	7.50 (-1.9%)	21.54 (-6.8%)	28.91 (-3.7%)	31.01 (-4.9%)	35.47 (-11.1%)
	50	5.35 (-5.2%)	7.29 (-4.6%)	17.52 (-24.2%)	24.19 (-19.5%)	26.64 (-18.3%)	30.57 (-23.4%)
	75	5.23 (-7.2%)	7.09 (-7.3%)	14.48 (-37.4%)	21.15 (-29.6%)	23.11 (-29.1%)	25.76 (-35.4%)
	100	5.22 (-7.5%)	6.94 (-9.3%)	11.78 (-49.0%)	16.82 (-44.0%)	18.51 (-43.2%)	20.30 (-49.1%)

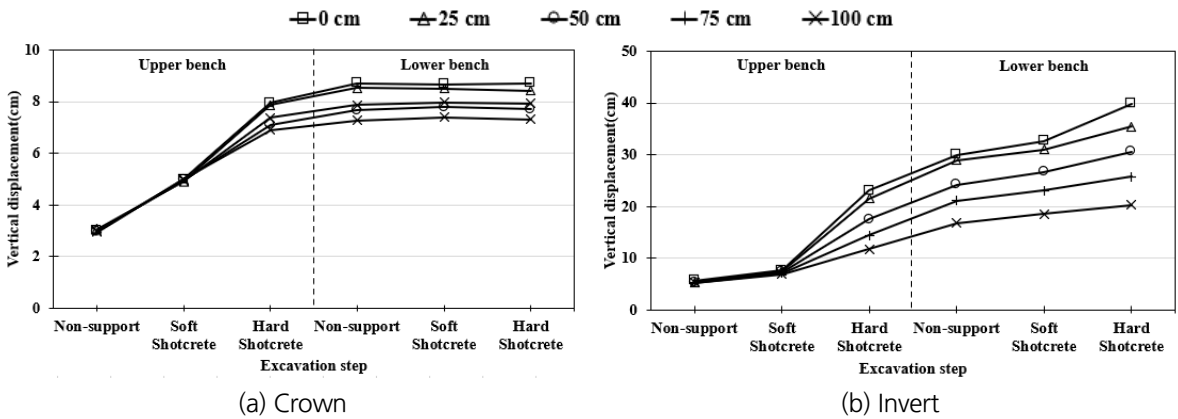


Fig. 4. Vertical displacement by depth of invert (T.D.-3, S.T. = 25 cm)

해석 결과, 천단부 및 바닥부에서 상반 무지보에서 연성단계로 진행될 때 바닥부 중앙 깊이와 관계없이 변위가 매우 유사하게 발생하고 상부 연성단계 이후부터 바닥부 깊이별 변위량이 각각 다르게 나타났다. 또한, 하반 굴착 시 천단부는 수직변위가 일정하고 바닥부는 경성단계로 갈수록 변위가 크게 발생하는 경향이 나타났다. 한편,

바닥부 중앙 깊이가 커질수록 천단부에서 최대 16.7% 및 바닥부에서 최대 49.1%의 변위 감소율이 나타나 터널 바닥부 곡률의 크기로 인한 보강 효과를 확인하였다.

5.3 지보재의 휨응력 분석

바닥부(invert) 중앙 깊이가 지보재의 휨응력에 미치는 영향을 분석하기 위해, 응회암 변질대 4등급인 경우, 터널 바닥부 깊이별 지보재의 휨압축 및 인장응력 분포를 Fig. 5에 나타내었고, 최대휨응력을 정리하여 Table 6에 서술하였다. 한편, 지보재의 허용 휨압축응력 f_{ca} 및 휨인장응력 f_{ta} 는 일반적으로 적용하는 값인 12.8 MPa 및 -0.91 MPa를 적용하여 허용 값을 초과할 시 해당 지보재는 파괴된 것으로 판별하였고, 그래프 상에서 파선으로 경계를 나타내었다. 또한, 잔류강도는 허용 휨압축응력의 절반인 6.4 MPa를 적용하였다.

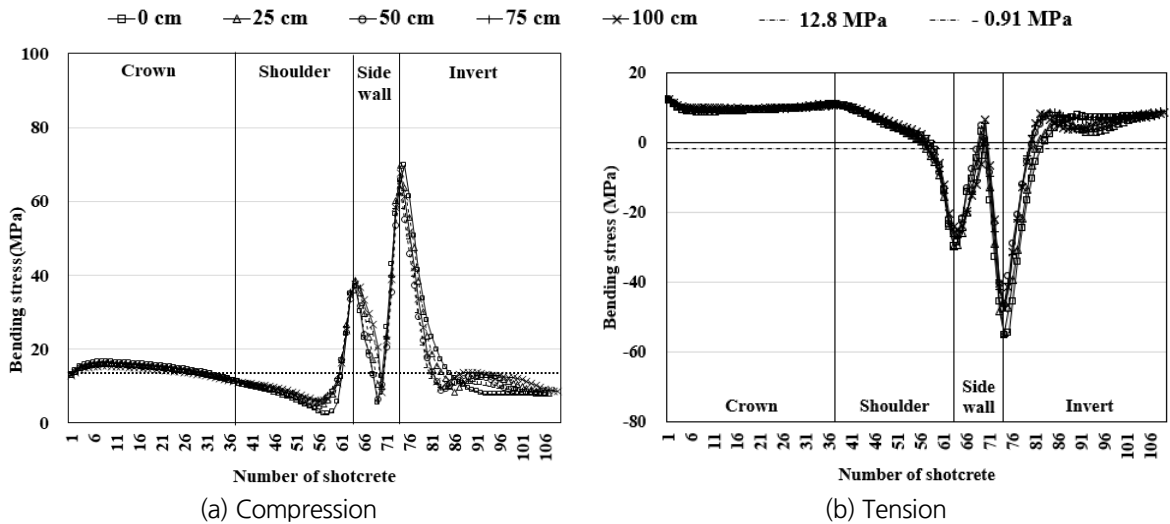


Fig. 5. Distribution of bending stress of shotcrete by depth of invert (T.D.-4, S.T. = 25 cm)

Table 6. Maximum bending stresses of shotcrete by depth of invert (T.D.-4) (unit: MPa)

Depth of invert \ Shotcrete thickness (cm)	Compression					Tension				
	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm
25	69.9	69.8	62.8	64.8	67.7	-55.0	-53.7	-45.6	-46.4	-48.2
40	58.6	57.0	55.5	51.9	50.9	-46.7	-43.8	-40.7	-37.0	-35.4

일반적으로 터널 바닥부의 곡률이 커질수록 즉, 바닥부 중앙 깊이가 깊을수록 휨압축 및 인장응력은 감소하는 추세를 보였다. 참고로 모든 최대응력은 측벽부와 바닥부 경계에서 응력집중으로 발생하였고, 또한 어깨부와 측벽부의 경계부에서도 휨응력이 크게 작용하여 파괴가 발생하였다. 다만, 두께가 25 cm일 경우는 깊이가 75 cm,

100 cm로 깊어질 때 최대 휨응력이 오히려 증가하는데, 이는 모서리 경계부의 요소망이 곡률에 따라 일정하게 작성되지 못해서 생기는 수치해석 상의 오류로서 지보재의 두께가 상대적으로 작은 25 cm인 경우에 두드러지게 나타난 현상이라고 판단된다.

샷크리트가 두꺼운 40 cm의 경우가 최대휨응력이 모두 작게 발생하는 최대압축과 인장응력은 각각 58.6 MPa 및 -46.7 MPa으로 나타났으며, 터널 바닥부의 곡률이 커질수록 최대 휨압축응력은 13.1% 감소하고 휨인장응력은 24.2%까지 증가하였다. 한편, 바닥부 깊이 25 cm 이상의 경우 바닥부에서 약 0.2 MPa 정도 미소하게 허용 휨 압축응력을 초과하여 파괴가 발생했다. 이는 측벽부에 작용하는 응력이 분산된 만큼 터널 바닥부에 작용하여 바닥부의 곡률 효과가 나타났기 때문이라고 판단된다.

5.4 터널 지보재 파괴영역 및 주변 지반의 소성영역 분석

터널의 안정성을 부가적으로 평가하기 위해 바닥부 곡률이 없거나 가장 큰 경우를 대상으로 터널 지보재의 파괴영역과 주변 지반의 소성영역을 Fig. 6에 도시하였다. 여기서 소성영역은 하반 경성단계가 진행된 이후의 상태이다. 바닥부 중앙 깊이가 0 cm의 경우 터널 상반에서 어깨부, 하반에서 측벽부 및 바닥부 모서리부에서 파괴가 발생하였다. 또한, 터널 바닥부에서 소성영역이 넓게 발생하여 해당 터널의 주변 지반이 불안정한 것을 확인하였다.

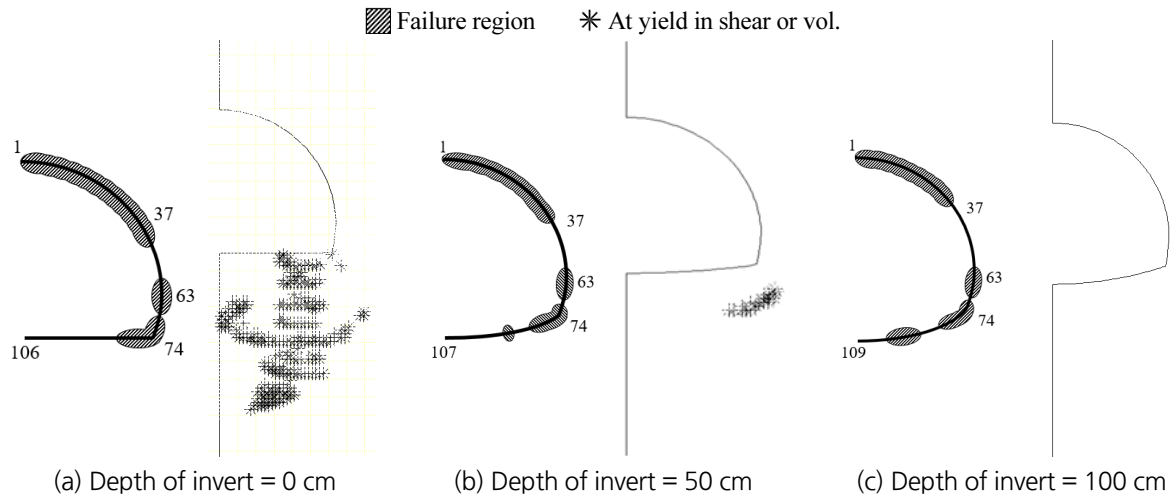


Fig. 6. Shotcrete failure region and ground plastic locations by depth of invert (T.D.-4, S.T. = 25 cm)

바닥부 깊이가 50 cm의 경우 터널 상반에서 지보재 파괴가 발생했으나 바닥부가 수평한 경우보다 파괴영역이 줄어들어 어깨부에서는 파괴가 발생하지 않았지만, 측벽부 및 바닥부 모서리부에서도 여전히 파괴가 발생하였다. 터널 주변 지반 소성영역은 바닥부 모서리부에서 미소하게 발생하였다. 바닥부 깊이 100 cm의 경우는 깊이 50 cm의 경우와 파괴분포가 비슷하게 나타났지만, 천단부의 파괴영역은 깊이 50 cm의 경우에 비해 줄어들었고, 바닥부의

파괴영역은 증가하였다. 이는 곡률형상(곡선모양)으로 인해 지보재가 응력을 받는 면적이 증가하여 생긴 것으로 판단된다. 한편 터널 주변 지반의 소성영역은 나머지 경우와 다르게 발생하지 않았다.

6. 결론

본 연구에서는 FLAC 2D 5.0을 이용하여 연약지반 터널의 바닥부 곡률의 영향을 분석하기 위해 지반, 지보재, 바닥부(invert) 곡률을 달리하여 수치해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 바닥부 중앙 깊이가 깊어질수록 약 4~14%의 안전율이 증가하는 경향이 나타나 터널 바닥부 곡률로 인한 안정성이 확보됨을 확인하였다. 한편, 바닥부 깊이가 75 cm에서 100 cm로 증가할 때 지보재 두께 25 cm의 경우 0, 25, 50, 75 cm의 조건에 비해 안전율이 4%로 적게 증가하였다. 이는 바닥부 곡률이 커지는 만큼 바닥부에 작용하는 응력의 크기가 25 cm 두께인 지보재의 강도 값에 근접한 것으로 판단된다.
2. 지반 및 지보재의 조건과 관계없이 터널 바닥부 곡률이 커질수록(중앙 깊이가 깊어질수록) 지표면 및 터널의 내공변위가 감소하였다. 특히 천단부에서 최대 16.7% 및 바닥부에서 최대 49.1%의 변위감소율이 나타나 터널 바닥부 곡률의 크기로 인한 보강 효과를 확인하였다.
3. 터널 지보재 두께가 40 cm인 경우, 측벽부 및 바닥부의 경계에서 최대휨압축 및 휨인장응력이 각각 58.6 MPa 및 -46.6 MPa으로 발생하였고, 터널 바닥부의 곡률이 커질수록 최대휨압축 및 인장응력이 각각 최대 13% 및 24% 정도 각각 감소 및 증가하여 터널의 안정성이 증대되는 것을 확인하였다.
4. 터널 바닥부에 곡률이 없는 경우 터널의 천단부를 넘어서 어깨부까지 지보재가 파괴되었다. 또한, 바닥부에서 소성영역이 넓게 발생하였다. 반면 바닥부에 곡률이 있는 경우 어깨부까지 지보재가 파괴되지 않았으나 바닥부에서 일부 파괴가 발생하였다. 또한, 주변 지반에서 소성영역이 발생하지 않아 주변 지반이 안정해지는 것을 확인하였다.

종합적으로 터널의 안전율, 내공변위, 지보재의 응력분포를 분석한 결과 터널 바닥부의 곡률이 커질수록 수평한 바닥부보다 안정성이 확보되는 결과를 도출했다. 다만, 해석결과 터널 바닥부에서 변위가 상향으로 발생하는 경향이 나타났는데, 이는 Mohr-Coulomb 모델의 한계 때문으로 판단되는바, 추후 다른 모델에 대한 연구도 필요할 것으로 생각된다. 또한, 축압계수를 1.0만 적용하여 수치해석을 수행하였으므로 향후 축압계수별 터널 바닥부의 곡률의 영향을 분석한다면 기존보다 신뢰성이 향상되는 결과가 도출될 것으로 판단된다.

저자 기여도

유광호는 연구 개념 및 설계, 데이터 수집 및 분석과 원고검토를 하였고, 김강산은 데이터 해석 및 원고작성을 주로 하였다.

References

1. Cho, N.H. (2020), Analysis on floor heaving of road tunnels excavated in weak ground conditions, Ph.D. Dissertation, The University of Suwon, 153p.
2. Donald, I.B., Giam, S.K. (1988), "Application of the nodal displacement method to slope stability analysis", Proceedings of the Fifth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Sydney, Australia, pp. 456-460.
3. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
4. Lee, I.H. (2018), "Uplifting phenomenon and countermeasures occurring at the tunnel floor during construction and public use", Railway Journal, Vol. 21, No. 3, pp. 68-78.
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020), Yearbook of road bridge and tunnel statistics, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 69p.
6. Naylor, D.J. (1982), Finite Elements and Slope Stability, Numerical Methods in Geomechanics (Martins J.B. eds.), NATO Advanced Study Institutes, Lisbon, Portugal, pp. 229-244.
7. Park, Y.J., You, K.H. (1998), "Stability analysis for jointed rock slope using ubiquitous joint model", Tunnel and Underground Space, Vol. 8, No. 4, pp. 287-295.
8. Park, J.W., Park, Y.J., You, K.H., Lee, S.D. (2004), "A study on the assessment of safety factor of tunnels", Tunnel and Underground Space, Vol. 14, No. 5, pp. 327-338.
9. 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.
10. You, K.H., Park, Y.J., Kang, Y. (2001), "A numerical study on the estimation of safety factor of tunnels excavated in jointed rock mass", Tunnel and Underground Space, Vol. 11, No. 3, pp. 279-288.
11. You, K.H., Park, Y.J. (2002), "Stability analysis of a 2 arch tunnel considering excavation sequence", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 4, No. 2, pp. 167-174.
12. You, K.H., Park, Y.J., Hong, K.Y., Lee, H.K., Kim, J.K. (2005), "Numerical estimation for safety factors of tunnels considering the failure of supports", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 7, No. 1, pp. 37-49.
13. You, K.H., Lee, M.H., Park, Y.J. (2007), "Comparison and validation on shotcrete modelling method for the quantitative stability estimation of a tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 9, No. 2, pp. 99-107.
14. Zienkiewicz, O.C., Humpheson, C., Lewis, R.W. (1975), "Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics", Geotechnique, Vol. 25, No. 4, pp. 671-689.