

수치해석을 통한 성토 높이에 따른 터널 안정성 평가 연구

이강현¹ · 이상래² · 김낙영^{3*}

¹정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

²비회원, 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

³정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구위원

Assessment of tunnel stability according to height of embankment by numerical analysis

Kang-Hyun Lee¹ · Sangrae Lee² · Nag-Young Kim^{3*}

¹Principal Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute

²Principal Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute

³Senior Research Fellow, Korea Expressway Corporation Research Institute

*Corresponding Author : Nag-Young Kim, ynaqkm@ex.co.kr

Abstract

The construction of the tunnel portal should be careful because cover depth is shallow and it is difficult to exhibit the arching effect. Tunnel stability may be reduced with additional embankment above the portal of tunnel. In this study, in order to examine the stability of the tunnel according to additional embankment above the portal of tunnel, numerical analysis was performed while changing the ground conditions and height of embankment. As a result of the numerical analysis, it was found that the allowable flexural compressive stress of shotcrete and allowable axial force of rockbolts were exceeded when the height of additional embankment was 12 m in rock mass rating V. When considering the displacement, the range of the plastic region and the behavior of the support materials, the tunnel stability seems to be greatly reduced if the height of additional embankment above the portal of tunnel exceeds 10 m.

Keywords: Tunnel, Stability, Cover depth, Height of embankment

초 록

터널의 갱구부는 토피가 얇고 지반의 아칭효과가 발휘되기 어렵기 때문에 터널 시공 시 주의가 필요한 구간이다. 공용 중인 터널 갱구부 상부에 추가적인 성토가 이루어진다면 터널 안정성을 크게 저해할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 터널 상부의 추가 성토에 따른 터널 안정성을 검토하고자 지반조건별로 성토 높이에 따른 수치해석을 수행하였다. 해석 결과 5등급 암반에서 성토 높이가 12 m 이상인 경우에는 슛크리트의 허용 휨압축 응력, 록볼트의 허용 축력을 초과하는 것으로 나타났다. 발생하는 변위와 소성영역의

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
23(1)37-45(2021)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.1.037>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 22, 2020

Revised January 15, 2021

Accepted January 15, 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

www.kci.go.kr

범위, 지보재의 상태를 종합적으로 고려할 때 터널 갱구부 상부에 추가 성토되는 높이가 10 m를 초과하는 경우에는 터널 안정성이 크게 저해되는 것으로 판단된다.

주요어: 터널, 안정성, 토피고, 성토 높이

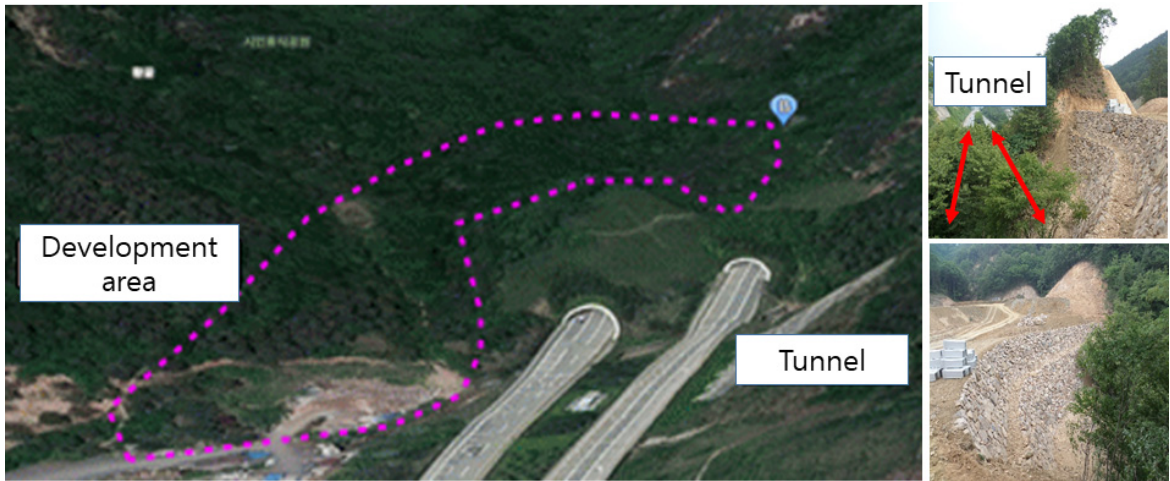
1. 서론

터널의 갱구부는 일반적으로 토피가 얇아서 지반의 아칭효과가 발휘되기 어렵고 편토압이 작용하는 경우가 많기 때문에 깎기나 터널굴착에 의한 비탈면 붕괴가 유발될 수 있으며 시공 시 주의가 필요하다. 터널 갱구부 및 사면에 대한 연구는 국내에서도 터널 설계와 병행하여 활발히 진행되고 있으며, 붕괴사고도 적지 않게 보고되고 있다(Min et al., 2004). 따라서 터널 갱구부 및 갱구사면을 대상으로 안정성을 평가하거나 붕괴 발생 사례에 대한 연구가 다수 진행되었다(Moon et al., 2009; Jeong and Seo, 2013; Lee et al., 2015; Zhou et al., 2016). 또한 공용 중에 추가적인 상재하중이 작용하게 된다면 터널 안정성이 매우 저하될 수 있다. 일반적으로 터널이 공용되는 시점의 노선을 기준으로 토지 매입이 이루어지고 시공 중에만 필요한 토지는 임대하게 되므로, 공용 중인 터널 갱구부 상부에 성토를 하는 사례가 간혹 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 터널 갱구부 상부에 성토를 한 사례에 대한 분석 및 터널 상부의 추가 성토높이 및 지반물성에 따른 터널 안정성을 검토하고자 수치해석을 수행하였다.

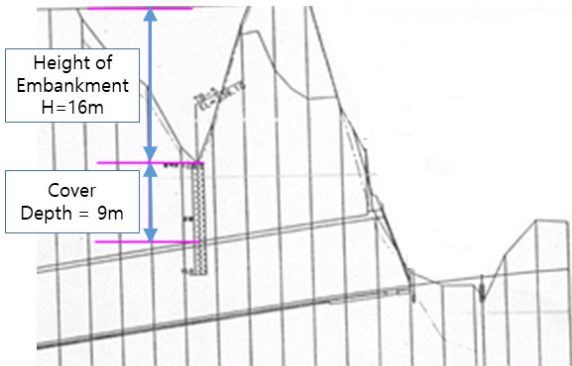
2. 현장 현황 및 분석

본 연구에서는 공용 중인 터널 갱구부 상부에 성토를 하는 사례로부터 터널 안정성에 대한 평가를 수행하고자 하였다. 따라서 대표적인 사례에 대한 현장 현황 및 분석을 수행하였다. 터널이 위치한 구간은 지질도상으로 옥천지향사가 속하는 구간으로 천매암, 점판암, 석영반암으로 구성되어 있다. 대상 터널은 NATM 공법 및 개착공법으로 시공되었으며, 설계 자료를 검토한 결과 표층에는 얇은 붕적층, 하부는 경암으로 이루어져 있고 3~4등급의 암반이 분포하는 것으로 나타났다.

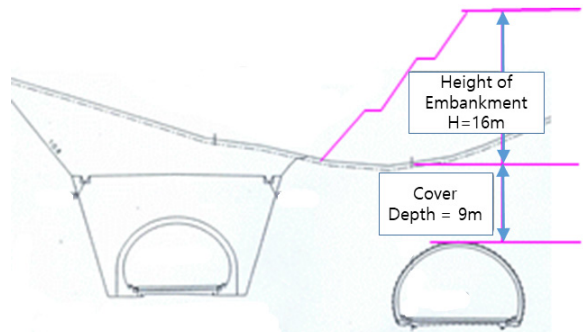
터널 상부 성토가 시행된 구간 중 터널의 최소 토피고는 약 9 m, 최대 성토높이는 약 16 m 정도로 조사되었다(Fig. 1). 일반적으로 터널 굴착 완료 후에 계층값의 수렴여부를 확인하여 터널의 안정성을 평가한다. NATM 터널은 시공이 완료된 후에 안정된 상태를 유지하기 위해서는 외적인 하중의 변화가 없어야 한다. 따라서 본 사례처럼 터널 저토피고 구간 상부에 성토를 실시하는 경우에는 평형상태가 유지되고 있는 터널 안정성에 불리한 영향을 줄 수도 있다.



(a) Panoramic view of field



(b) Drawing of longitudinal section



(c) Drawing of cross-section

Fig. 1. The site status

현장의 지반조건을 조사하기 위하여 총 2공의 시추조사를 실시하였고, 시추코어로부터 RQD, TCR 등을 평가하였다(Fig. 2). 시추조사 결과 표층에는 매립층, 붕적층 등의 강도가 약한 지반이 위치해있는 것으로 조사되었고, 터널 천단부 상부 약 10 m 정도의 두께로 연암이 위치해있는 것으로 나타났다. 다만 연암으로 분석된 구간의 RQD는 0~17정도로 매우 낮게 나타났다.

암반등급을 산정하기 위해서는 RMR (Rock mass rating) 방법을 주로 사용한다. RMR은 일축압축강도, RQD, 불연속면의 간격, 불연속면의 상태, 지하수의 상태, 불연속면의과 터널의 상대적인 방향을 종합적으로 고려해서 산정해야 한다. 따라서 실질적으로 RQD만으로 암반 등급을 판단하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 성토가 시행된 하부 구간의 암반등급을 추정하기 위하여, 다른 지역 6개 현장의 시추코어 중에서 RQD가 0~20인 경우의 RMR 분포를 분석하였다. RQD가 0~20인 경우, RMR이 10~45사이의 분포를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 3). 따라서 터널이 위치한 구간의 암반등급을 3~5등급으로 추정하였다.

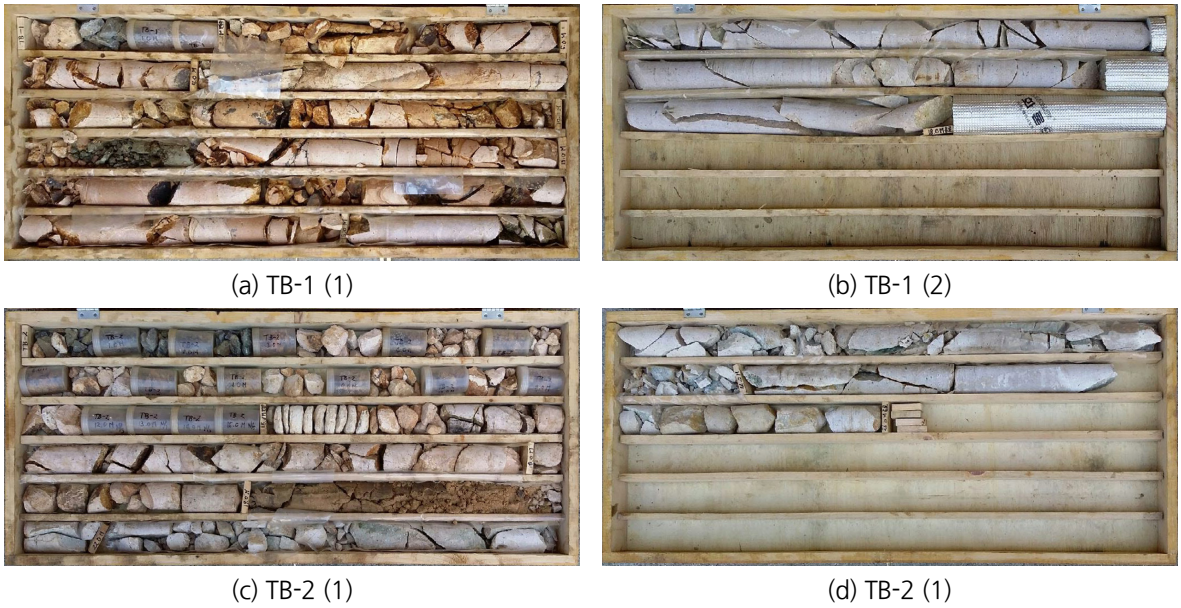


Fig. 2. Drilling core sample

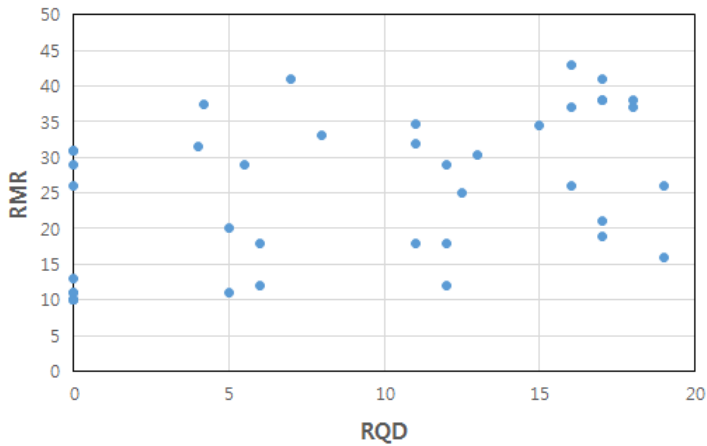


Fig. 3. Distribution of RMR according to RQD

3. 수치모델링

3.1 수치해석 입력물성 및 해석조건

저토피고 구간인 공용중인 터널 갱구부 상부에 추가 성토로 인하여 터널의 안정성이 어떻게 변화하는지 평가하기 위해서 성토부의 토피고 및 지반조건, 지보패턴을 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서 대표 사례로 선택한 대상 현장의 터널 해석 보고서와 지반조사 보고서를 바탕으로 해석에 사용될 물성을 Tables 1, 2에 정리하였으며(Korea Expressway Corporation, 2000a; 2000b), 정지토압계수(K_0)는 0.5~2.0으로 가정하였다. 터널이 위치한 구간의 암반등급으로 추정된 3~5등급 암반에 대해서 범용 유한요소해석 프로그램 MIDAS GTS를 사용하여 해석을 수행하였다. 터널 상부 기존의 토피고는 10 m로 고려하였으며, 성토부의 토피고는 0~20 m까지 변화시켰다(Fig. 4). 암반등급, 정지토압계수, 성토부의 높이에 따른 총 54가지의 해석 사례를 Table 3에 정리하였다.

Table 1. Properties of rock mass for numerical analysis

| Rock mass rating/ Soil type | Unit weight (kN/m ³) | Cohesion (kPa) | Friction angle (°) | Elastic Modulus (MPa) | Poisson's ratio |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|
| III | 24.0 | 800 | 38 | 6,500 | 0.25 |
| IV | 22.0 | 200 | 35 | 2,200 | 0.27 |
| V | 21.0 | 50 | 32 | 500 | 0.30 |
| Embankment soil | 19.0 | 20 | 30 | 30 | 0.32 |

Table 2. Properties of supports for numerical analysis

| Materials | | Unit weight (kN/m ³) | Elastic modulus (MPa) | Remarks |
|-----------|------|-------------------------------------|--------------------------|--|
| Shotcrete | Soft | 24.0 | 5,000 | Compressive strength $f_{ck} = 10$ MPa |
| | Hard | 24.0 | 15,000 | Compressive strength $f_{ck} = 21$ MPa |
| Rockbolt | | 78.0 | 200,000 | Yield strength $f_y = 350$ MPa, Diameter $d = 25$ mm |

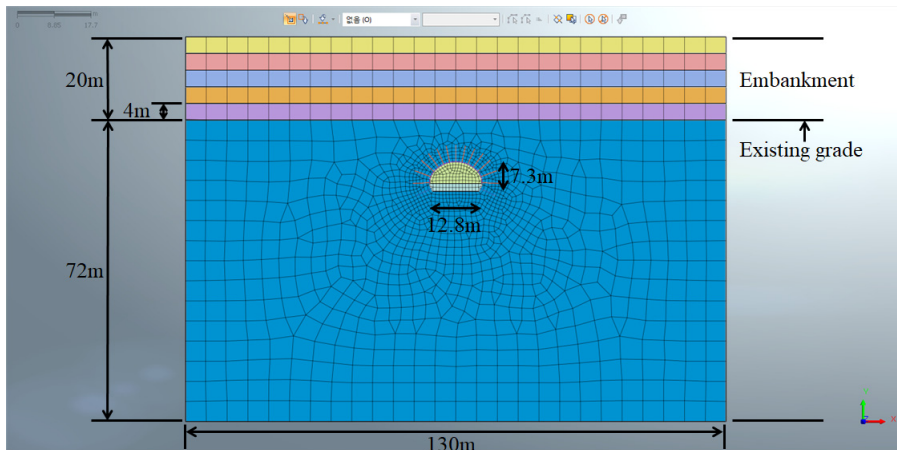


Fig. 4. Model for numerical analysis

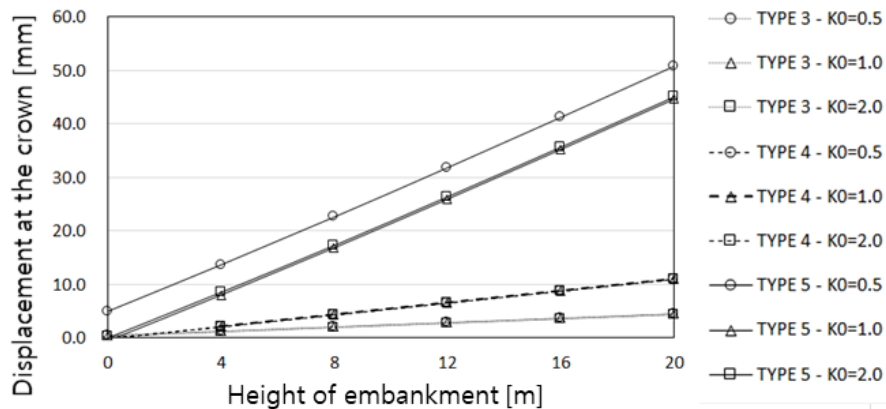
Table 3. Analysis case

| Rock mass rating (support pattern) | Coefficient of lateral earth pressure at rest (K_0) | Height of embankment (m) | Remarks |
|---------------------------------------|--|--------------------------|------------|
| III (Type 3) | 0.5 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 1~6 |
| | 1.0 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 7~12 |
| | 2.0 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 13~18 |
| IV (Type 4) | 0.5 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 19~24 |
| | 1.0 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 25~30 |
| | 2.0 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 31~36 |
| V (Type 5) | 0.5 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 37~42 |
| | 1.0 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 43~48 |
| | 2.0 | 0, 4, 8, 12, 16, 20 | Case 49~54 |

3.2 수치해석 결과 분석

수치해석 결과로부터 천단변위, 내공변위, 숏크리트의 휨압축·휨인장 응력, 록볼트의 축력을 정리하였다. 성토 높이가 증가할수록 변위가 증가하는 양상을 보인다. 정지토압계수가 1보다 작은 경우에는 내공변위보다 천단 변위가 크고, 정지토압계수가 1보다 큰 경우에는 연직응력보다 수평응력이 더 크기 때문에 천단변위보다 내공변위가 크게 나타났다(Figs. 5, 6). 3등급 암반에서는 소성영역이 터널 굴착면 주위에서 넓은 범위에 걸쳐 나타났으며, 4등급 암반의 경우 일부 구간에서 소성영역이 발생하였다.

변위와 마찬가지로 추가 성토되는 토피고가 증가할수록 숏크리트에 작용하는 응력 및 록볼트 축력이 증가하는 양상을 보였다. 5등급 암반에서는 터널 상부에 추가 성토되는 높이가 12 m 이상인 경우에는 정지토압계수의 크기에 관계없이 숏크리트에 작용하는 휨압축응력(9.184~13.841 MPa)이 허용휨압축응력(8.40 MPa)을 초과하여 숏크리트에 파괴가 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 또한 터널 상부에 추가 성토되는 높이가 16 m 이상인 경우에는 록볼트의 허용 축력(88.7 kN)을 초과하는 축력(95.048~127.444 kN)이 작용하는 것으로 나타났다(Fig. 8).

**Fig. 5.** Displacement at the crown according to height of embankment

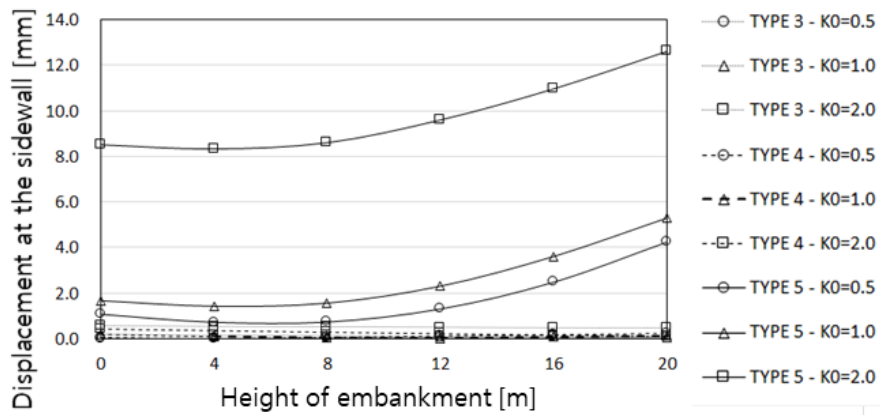


Fig. 6. Displacement at the sidewall according to height of embankment

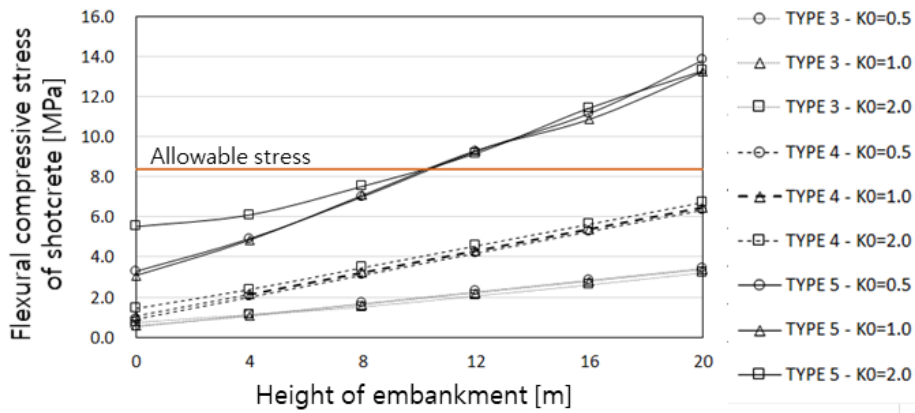


Fig. 7. Flexural compressive stress of shotcrete according to height of embankment

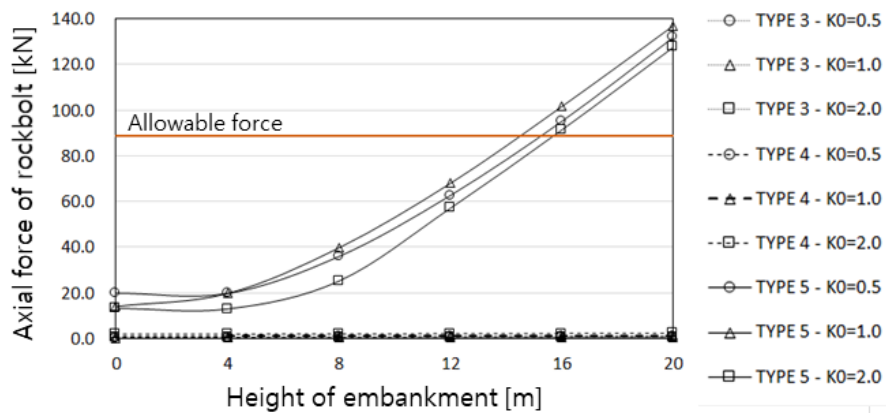


Fig. 8. Axial force of rockbolt according to height of embankment

변위 발생 양상과 소성영역의 범위, 지보재의 상태를 고려할 때 5등급 암반에서 성토 높이가 약 10 m 이상인 경우에는 정지토압계수에 상관없이 터널 안정성을 크게 저해하는 것으로 판단된다. 따라서 주변 지반의 침하 및 인장균열, 공용 중인 터널 라이닝의 균열 및 변상여부 등을 지속적으로 관찰해야 할 것으로 판단된다.

KECRI (2001)에 따르면 굴착 후 타설되는 강섬유보강 슛크리트는 일반 슛크리트에 비하여 설계기준강도(f_{ck})가 약 10% 증가한다고 알려져 있으며, 파괴 후에도 지지력을 상실하지 않아 에너지 흡수량이 수백 퍼센트(%)가 증가한다고 한다. 또한 강섬유 보강 슛크리트의 허용휨응력을 일반 슛크리트 값보다 약 50% 증가시켜 사용하는 것이 타당하다고 알려진 바 있다(You et al., 2005; 2009). 이러한 기존 연구결과를 바탕으로 슛크리트의 허용응력 기준을 상향시켜서 5등급 암반에서 터널의 안정성을 검토하더라도 성토 높이가 12 m를 초과하는 경우 터널의 구조적 안정성이 크게 저해되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 공용 중인 터널 갱구부 상부에 성토를 하는 사례를 통해, 현장여건을 분석하고 지반조건, 성토높이 등에 따른 터널의 안정성을 평가하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 원 지반이 3, 4등급 암반인 경우에는 터널 상부에 추가 성토되는 높이가 20 m가 되더라도 변위 및 지보재의 응력이 안정한 것으로 나타났으나, 5등급 암반에서는 성토 높이가 12 m 이상인 경우에는 슛크리트의 허용휨압축응력, 록볼트의 허용축력을 초과하는 것으로 나타났다.
2. 처토피고로 아칭효과가 발생하긴 어려운 터널 갱구부 상부에 추가 성토되는 높이가 10 m를 초과하는 경우에는 터널 안정성이 크게 저해될 것으로 판단되며, 터널 갱구부 직상부가 아닌 측면에만 성토가 된다고 하더라도 편입이 작용하여 터널 안정성이 더욱 저하될 것으로 판단된다.
3. 따라서 공용 중인 터널이라 하더라도 터널 갱구부 상부에 대한 지속적인 유지관리를 통해 장기적인 터널 안정성을 도모해야 할 것으로 판단된다.

저자 기여도

이강현은 데이터 수집 및 해석, 원고작성을 하였고, 이상래는 데이터 해석 및 분석을 하였고, 김낙영은 연구개념 및 설계, 원고검토를 하였다.

References

1. Jeong, H.G., Seo, Y.S. (2013), "Slope stability analysis and landslide hazard assessment in tunnel portal area", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 4, pp. 387-400.

2. KECRI (2001), Enhancement and quality control of steel fiber reinforced shotcrete (II), Korea Expressway Corporation Research Institute, pp. 199.
3. Korea Expressway Corporation (2000a), Tunnel analysis report for ○○-□□ Construction △ Section.
4. Korea Expressway Corporation (2000b), Geotechnical investigation report for ○○-□□ Construction △ Section.
5. Lee, K.H., Choi, T.J., Lee, Y.K. (2015), "Slope stability analysis and reinforcement in tunnel portal area", Proceedings of the Korean Geo-Environmental Society Conference, Seoul, pp. 254-258.
6. Min, K.N., Yoon, J.O., Lee, T.S., Ko, G.T., Lim, D.H. (2004), "A case study on stability analysis and reinforcement measures of the collapsed slope at tunnel portal", Proceedings of the Annual Conference and General Assembly of Korean Society for Rock Mechanics, Daejeon, pp. 49-59.
7. Moon, S.H., Lee, S.P., Oh, S.H., Oh, J.G. (2009), "A case study on the design and construction of NATM tunnel with low cover depth", Proceedings of the Annual Conference and General Assembly of Korean Society for Rock Mechanics, Suwon, pp. 385-390.
8. 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.
9. You, K.H., Jung, J.S., Park, Y.J. (2009), "A study on the bending stresses of tunnel shotcrete due to the coefficient of lateral earth pressure", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 1, pp. 23-35.
10. Zhou, X., Hu, H., Jiang, B., Zhou, Y., Zhu, Y. (2016), "Numerical analysis on stability of express railway tunnel portal", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 57, No. 1, pp. 1-20.