

운영중인 도로터널의 측벽하부 슛크리트 보강에 의한 단면확대

김동규^{1*}, 신영완²

Section enlargement by reinforcement of shotcrete lining on the side wall of operating road tunnel

Dong-Gyou Kim, Young-Wan, Shin

ABSTRACT The protector with the shape of ‘ \square ’ in cross section can be set up in the tunnel, which can be constructed for enlargement of cross section, to keep traffic flow in the tunnel. It is impossible to install the rockbolt in the side wall of tunnel due to a limited space between the protector and cutting surface of side wall. The objective of this study is to suggest the optimum thickness of shotcrete lining without rockbolt on the side wall and to evaluate the stability of tunnel enlarged. Numerical analysis was performed to evaluate the displacement at the center of tunnel, the convergence of tunnel, and the stress in shotcrete lining in 4-lane NATM road tunnel enlarged from 3-lane NATM road tunnel. The vertical displacement at the center of tunnel and the convergence of crown in the tunnel with rockbolt in the side wall were almost similar to those in the tunnel without rockbolt in the side wall. The convergence of bench/invert and the stress in shotcrete lining without rockbolt on the side wall were greater maximum 0.57 mm and 1,300 kN/m² than those with rockbolt in the side wall. The increased convergence and the stress in shotcrete lining can be reduced in increasing of thickness of shotcrete lining about 20% (5 cm) of standard thickness, 25 cm, of shotcrete lining.

Keywords: Tunnel, enlargement, rockbolt, shotcrete, reinforcement, protector

요약 도심지내 기존터널을 단면확대 시공하는 경우, 터널내 교통흐름을 유지하기 위하여 ‘ \square ’형태의 프로텍터를 설치한다. 터널내 프로텍터를 설치하면 터널 측벽하부에서 작업공간이 협소하여 록볼트 시공이 불가능해 질 수가 있다. 본 연구는 터널의 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않고 슛크리트만으로 보강하여 터널단면을 확대된 할 경우, 터널구조물의 안정성과 보강되는 최적의 슛크리트 두께를 제시하는데 목적이 있다. 본 연구를 위하여 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM 도로터널로 확대 시공하는 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과, 4차선 NATM 도로터널의 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않은 경우의 천단변위와 상반 내공변위는 록볼트를 시공한 경우와 거의 유사하였다. 다만, 하반 내공변위 및 슛크리트 응력은 록볼트를 시공하지 않은 경우가 록볼트를 시공한 경우보다 최대 0.57 mm 및 최대 1,300 kN/m² 크게 나타났다. 터널 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않아 추가 발생한 하반 내공변위와 슛크리트 응력은 25 cm인 기본 슛크리트 두께의 20%(25 cm→30 cm)만 증가시켜도 저감시킬 수 있다.

주요어: 터널, 확대, 록볼트, 슛크리트 보강, 프로텍터

Received on November 1, 2012. Revised on November 12, 2012. Accepted on November 20, 2012.

¹정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

²정회원, 하계엔지니어링 전문

*Corresponding author: Dong-Gyou Kim, dgkim2004@kict.re.kr

Copyright ©2012, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

일반적으로 사회가 발전하면서 도심지의 인구가 증가하고, 이로 인해 교통량도 점차 증가하고 있다. 이러한 교통량 증가에 따른 교통정체를 해결하기 위해 신설도로를 건설하거나 기존 도로의 차선을 확대하여야 한다. 도심지내 터널과 연결되어 있는 기존차선을 확대할 때 기존 터널 주변에 신설터널을 건설하거나 기존터널을 확대하는 방법이 있다. 기존터널에 인접하여 새로운 터널을 건설하는 경우, 용지매입, 근접한 기존 터널의 안전성 확보, 녹지공간 점유에 의한 자연환경파괴 등 추가적인 경제적 사회적 부담이 발생한다. 또한, 도심지내에서 신설 도로터널을 건설할 경우 여유부지 확보 등이 곤란하여 추가적인 신설터널 시공이 곤란한 경우가 많다. 그래서, 선진 외국에서는 도심지내 공용중인 기존 도로터널의 단면을 확대하여 차선을 증가시키고 있다.

기존 터널의 단면을 확대할 경우, 터널내로 진입하는 차량을 완전 통제하고 시공하여야 하므로, 터널주변에서 상당한 교통정체를 유발할 수가 있다. 그래서, 선진외국에서는 터널내 교통통제에 의한 터널 주변의 교통정체 해소를 위하여 확대되는 터널내에 프로텍터를 설치하여 어느 정도 터널내 교통흐름을 유지하면서 터널단면을 확대 시공하는 사례가 있다(Kim and Jung, 2007; Baek and Roh, 2007; Seo et al. 2008a; Seo et al. 2008b) Fig. 1에서 보여주듯이 프로텍터를 활용하여 터널단면을 확대하는 공법은 터널내부에 사각형 단면의 프로텍터를 설치한 후, 프로텍터 내부로 차량통행을 허용하고, 프로텍터 외부에서는 터널단면 확대공사를 수행하는 것이다. 일본의 경우, 일본 토목 연구소에서 2003년 민간 19개 기관이 공동으로 터널확대 공법에 대한 연구를 수행하였다. 발파 굴착형·기계 굴착형의 프로텍터 설계 및 시공법등 8개의 공법을 개발하여 약 40여개의 기존터널에 대하여 확대 시공을 수행하였으며 대상지반도 토사~경암 등 모든 지반에서 적용가능한 공법들이 개발되었다. 또한, 프로텍터 내로 교통흐름을 유지한 채 프로텍터 외부에서 발파로 굴착을 하는 공법도 개발되었다. 국내에서도 터널단면 확대공법 개발을 위한 기초연구로 터널 굴착을 위한 발파시 발생하는 버력이 프로텍터에 가하는 충격하중에 대한 연구가 수행되었다(Kim et al., 2011).

그러나, Fig. 1 왼쪽부분에서 보여주듯이 프로텍터를 이용하여 터널단면을 확대하는 공법은 프로텍터 외부와 단면 확대된 터널 측벽하부사이가 협소하다. 특히, 굴착 바닥면에서 프로텍터 상부까지 터널 측벽하부는 작업공간이 매우 협소하여 록볼트 시공을 위한 천공 및 록볼트 시공이 불가능한 경우가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 프로텍터를 활용하여 공용중인 터널 단면을 확대 시공할 경우, 터널상부 및 측벽상부는 록볼트, 슛크리트 및 강지보재로 시공하고, 프로텍터 설치에 의해 발생하는 터널

측벽하부의 협소공간에서는 록볼트를 시공하지 않고 슛크리트의 두께만 증가시켜 터널구조물의 안정성을 확보할 수 있는 지에 대하여 수치해석을 수행하였다. 즉, 터널 측벽하부에서 슛크리트만으로 보강된 확대 터널구조물의 안정성 분석과 보강되는 최적의 슛크리트 두께를 제시하려고 한다. 본 연구를 위하여 국내 도심지에서 공용중인 기존 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM 도로터널로 확대 시공하는 경우를 가정하였다.

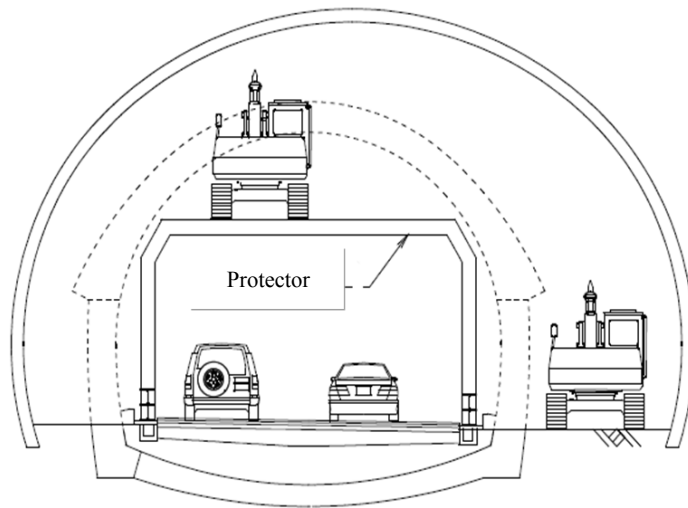


Fig. 1. Enlargement construction method using protector.

2. 수치해석 단면 및 해석조건

2.1 해석단면 및 조건

본 연구에서는 도심지내 공용중인 도로터널내 교통흐름을 유지하기 위하여 프로텍터를 사용하여 터널단면을 확대 시공할 경우, 프로텍터와 확대 굴착된 터널 측벽하부의 협소공간에서 록볼트 시공 유·무 및 슛크리트 두께 보강에 따른 터널 구조물의 안정성 평가를 위하여 다음과 같이 3가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다.

- 1) 터널 측벽하부에 슛크리트와 록볼트를 시공한 경우,
- 2) 터널 측벽하부에 록볼트를 시공하지 않고 슛크리트만 시공한 경우,
- 3) 터널 측벽하부에 록볼트를 시공하지 않고 슛크리트 두께를 3가지 경우로 증가한 경우

본 연구를 위하여 Fig. 2와 같이 운영중인 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM 도로터널로 확대하는 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 기존 3차선 NATM 도로터널과 확대되는 4차선 NATM 도로터널의 지보패턴과 단면을 보여주고 있다.

기존 3차선 NATM 도로터널의 지보패턴과 단면은 현재 도심지내에서 공용중인 도로터널(서울시 소재 ○○터널)의 준공도면을 사용하였다. 4차선 NATM 도로터널은 현재까지 국내에서 시공된 4차선 NATM 도로터널의 지보패턴과 단면을 사용하였다. Fig. 3과 Fig. 4에서 보여주듯이 3차선 및 4차선 NATM 도로터널의 지보패턴 등급이 P-5이므로 록볼트 및 슛크리트가 터널 전단면에 걸쳐 시공되는 것이 일반적이다. 3차선 NATM 도로터널에 적용되는 슛크리트의 두께는 20 cm이고, 록볼트는 길이 4 m로 종방향 및 횡방향 설치간격이 각각 1 m이다. 4차선 NATM 도로터널에 적용되는 슛크리트의 두께는 25 cm이고, 록볼트는 길이 5 m로 종방향 및 횡방향 설치간격이 각각 1 m이다.

도심지 도로터널은 일반적으로 양방향 통행을 위하여 병설터널이 대부분이고, 병설터널인 경우 양측확대가 곤란한 경우가 많으므로 편측확대에 대한 검토를 수행하였다. 편측확대에 대한 단면 검토시 편측확대가 가장 크게 될 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다.

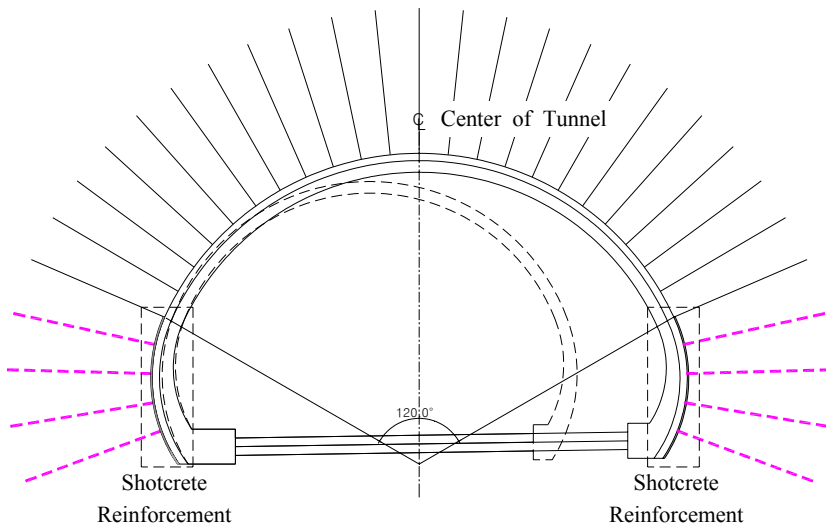


Fig. 2. Enlargement of NATM road tunnel (3-lane → 4-lane).

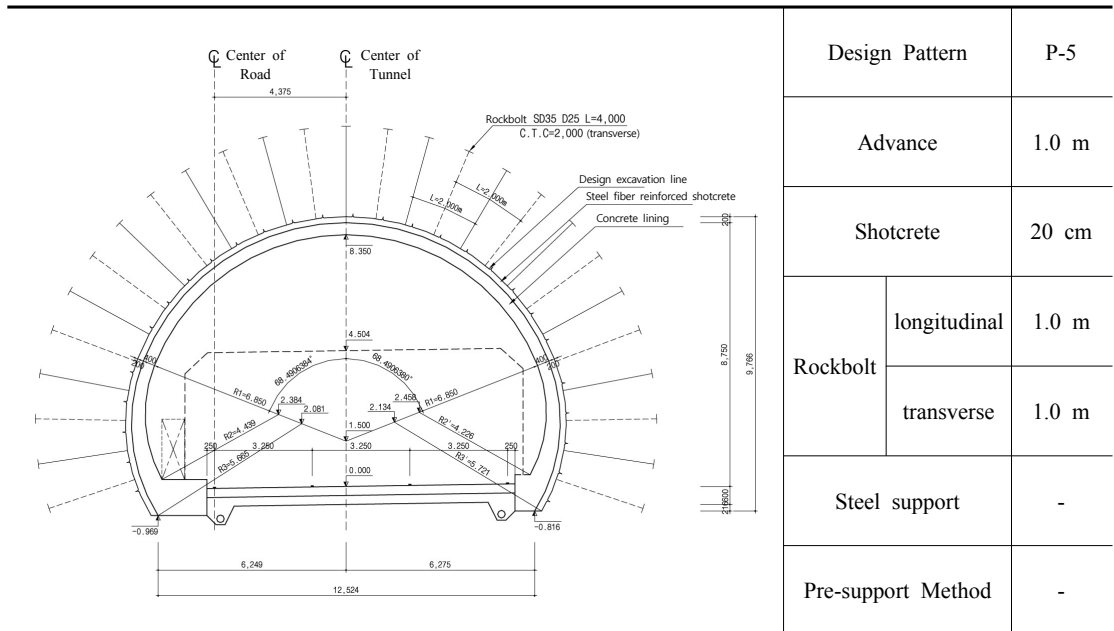


Fig. 3. Cross section of 3-lane NATM tunnel.

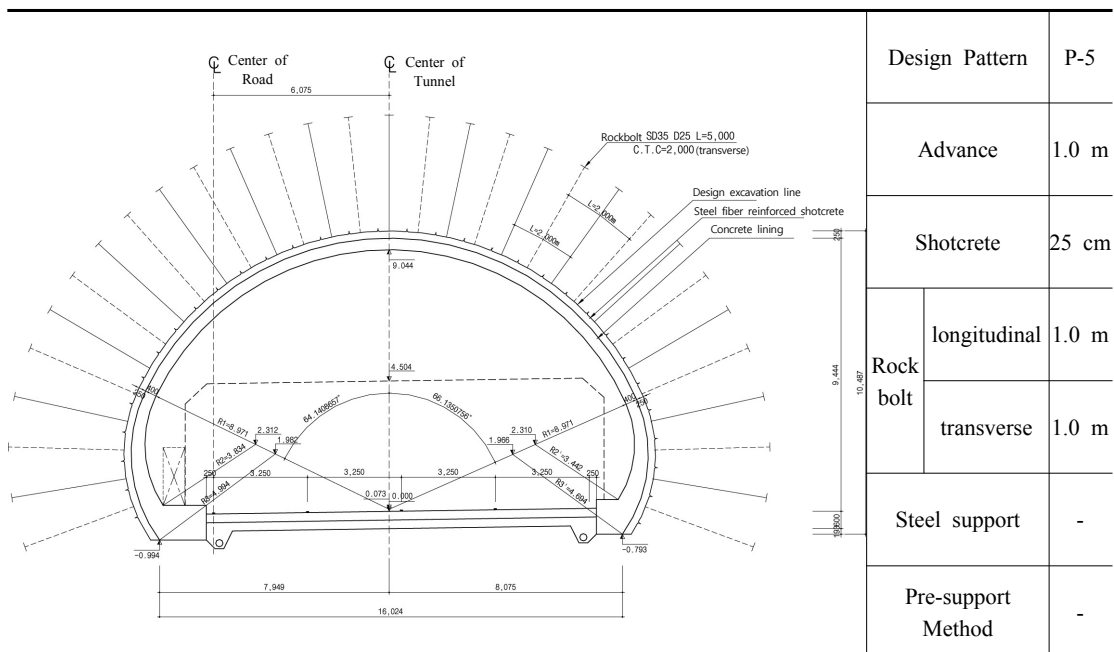


Fig. 4. Cross section of 4-lane NATM tunnel.

실제 시공조건(시공장비, 록볼트 길이)등에 따라 차이가 있지만, 본 연구에서는 터널 측벽하부의 록볼트 시공 유·무가 시공중인 터널 거동에 미치는 영향을 검토하는 것이므로 하부 굴착과 함께 터널 양쪽 측벽하부에서 록볼트(편측 4개, Fig. 2에서 점선으로 표시된 록볼트) 시공 유·무에 의한 터널 내 변위와 응력변화에 대하여 검토를 수행하였다. 또한, 4차선 NATM 도로터널의 양쪽 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않고 슛크리트로만 보강한 경우, 기본 슛크리트 두께 25 cm의 20%(5 cm), 40%(10 cm) 및 100%(25 cm)를 추가 보강한 3가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하여 최적 보강 슛크리트 두께를 결정하였다. 터널의 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않는 범위를 하부 바닥면 기준 120°범위로 가정하여 보강범위(Fig. 2에서 터널 양쪽측벽의 점선 박스 구간)를 설정하였다.

해석 대상의 지반조건은 Table 1에서 보여주듯이 기존 3차선 NATM 도로터널의 설계에서 사용된 지반물성치를 사용하였다. 본 지반의 암반등급은 V등급으로 Fig. 3과 4에서 보여주듯이 지보패턴 P-5를 적용하였다. Table 2는 해석단면의 지보재 물성치를 보여주고 있다. 슛크리트는 시간에 따른 경화를 고려하여 연성 슛크리트 단계와 강성 슛크리트 단계로 구분하여 적용하였다. Table 3은 하중분담률을 보여주고 있으며, 일반적으로 터널 상하반 굴착시 적용되는 굴착단계 40%, 연성 슛크리트 30% 및 강성 슛크리트 30%로 하중분담률을 적용하였다.

Table 1. Engineering properties of ground.

Rock grade	Unit weight (KN/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Poissons ratio (ν)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	lateral pressure ratio
V	21	500	0.30	200	30	1.0

Table 2. Engineering properties of supporting member.

		Unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (MPa)	
Rockbolt		78.5	210,000	SD35 D25
Shotcrete	soft	23.5	5,000	f _{ck} = 21 MPa
	hard	23.5	15,000	

Table 3. Load Distribution Factor.

	Excavation	Soft shotcrete	Hard shotcrete
Upper/lower excavation	40%	30%	30%

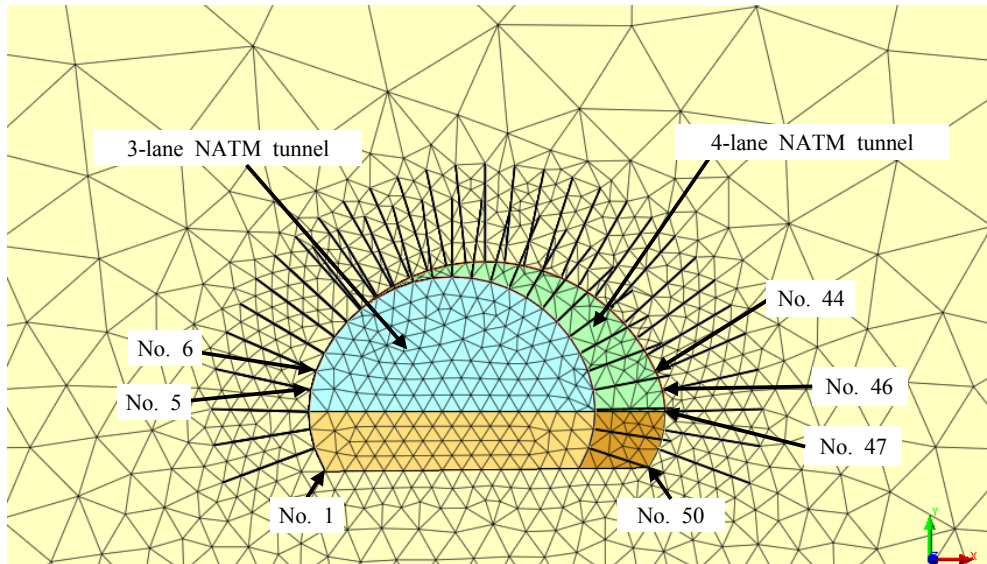


Fig. 5. Mesh for numerical analysis.

Fig. 5는 기존 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM로 단면 확대할 경우, 터널 구조물의 안정성 분석을 위해 사용된 해석단면을 보여주고 있다. Fig. 5에서 기존 3차선 NATM 도로터널은 좌측의 작은 마제형 터널이고, 확대되는 4차선 NATM 도로터널은 우측으로 확대되는 마제형 터널이다. 기존 3차선 NATM 도로터널 천단부부터 지표면까지의 높이는 기존자료를 바탕으로 20m로 결정하였다.

Table 4는 사공단계를 고려한 수치해석 단계를 보여주고 있다. 총 16단계로 수치해석을 수행하였으며 각 단계별 하중분담률도 보여주고 있다. 총 16단계의 수치해석에서 0단계에서 8단계까지는 안정화된 지반에 기존 3차선 NATM 도로터널 건설에 의해 발생하는 변위와 응력을 계산하기 위한 것이다. 10단계부터는 8단계에서 계산된 변위를 반영하여 해석단면을 재구성하여야 하므로 9단계에서는 8단계에서 계산된 변위를 초기화하여 10단계부터 수치해석을 수행하였다. 이것은 기존 3차선 NATM 도로터널이 이미 완공되어 운영중이므로 3차선 NATM 도로터널 건설에 의해 발생된 변위를 해석단면에 반영하여 4차선 NATM 도로터널의 안정성 분석을 수행하기 위한 것이다. 이렇게 계산된 변위와 응력을 바탕으로 10단계에서 15단계까지는 기존 3차선 NATM 도로터널의 콘크리트 라이닝을 제거한 후 발파굴착으로 4차선 NATM 도로터널로 확대하는 부분에 대한 거동 분석을 위한 것이다. 본 연구에서 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 유한요소해석을 수행하였으며 상용 프로그램 MIDAS-GTS를 사용하였다.

Table 4. Numerical analysis step.

	Analysis step	Load Distribution Factor
step 0	Ground initialization	-
step 1	null stage	-
step 2	Crown excavation for 3-lane tunnel	40%
step 3	Soft shotcrete and rockbolt support in the crown of 3-lane tunnel	70%
step 4	Hard shotcrete support in the crown of 3-lane tunnel	100%
step 5	Bench/invert excavation for 3-lane tunnel	40%
step 6	Soft shotcrete and rockbolt support in the bench/invert of 3-lane tunnel	70%
step 7	Hard shotcrete support in the bench/inver of 3-lane tunnel	100%
step 8	Concrete lining for 3-lane tunnel	-
step 9	initialization	Displacement zero
step 10	Removal of concret lining of 3-lane tunnel & Crown excavation for 4-lane tunnel	40%
step 11	Soft shotcrete and rockbolt support in the crown of 4-lane tunnel	70%
step 12	Hard shotcrete support in the crown of 4-lane tunnel	100%
step 13	Bench/invert excavation for 4-lane tunnel	40%
step 14	Soft shotcrete(and rockbolt) support in the bench/invert of 4-lane tunnel	70%
step 15	Hard shotcrete support in the crown of 4-lane tunnel	100%

3. 수치해석 결과 및 분석

기존 3차선 NATM 도로터널내에 교통흐름을 유지하기 위하여 프로텍터를 설치하고 4차선 NATM 도로터널로 확대 시공할 경우, 앞에서 서술한 바와 같이 3가지 조건, 즉, 1) 터널 측벽하부에서 슛크리트 및 록볼트를 시공한 경우, 2) 터널 측벽하부에서 슛크리트만 시공하고 록볼트를 시공하지 않은 경우, 3) 터널 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않고 슛크리트 두께만 증가한 3가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하여 터널 구조물의 안정성을 평가하였다. 터널 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않고 슛크리트 두께만 증가시킨 경우, 기존 슛트릭 두께(25 cm)에 기존 슛크리트 두께의 20%(5 cm), 40%(10 cm) 및 100%(25 cm)에 해당하는 슛크리트 두께를 추가 보강한 3가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하여 최적 보강 슛크리트 두께를 결정하였다.

3.1 측벽하부에서 록볼트 시공 유·무에 따른 터널거동

Fig. 6은 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM 도로터널로 확대 시공할 경우, 단면 확대된 4차선 NATM 도로터널 양쪽 측벽하부에서 록볼트 4개를 시공한 경우와 시공하지 않은 경우에 대한 터널의 천단침하(Fig. 6(a)), 상반 내공변위(Fig. 6(b)), 하반 내공변위(Fig. 6(c)) 및 슛크리트 응력(Fig. 6(d))을 보여주고 있다. 기존 3차선 NATM 도로터널의 전단면에 걸쳐 길이 4 m의 록볼트와 두께 20 cm의 슛크리트를 시공하였다. 4차선 NATM 도로터널에서는 터널 전단면에 걸쳐 두께 25 cm의 슛크리트를 동일하게 적용하였고, 터널 상부에 길이 5 m의 록볼트를 1 m 간격으로 시공하였다. 4차선 NATM 도로터널의 양쪽 측벽하부에서 록볼트 설치 유·무에 따른 터널 구조물의 거동을 비교하였다.

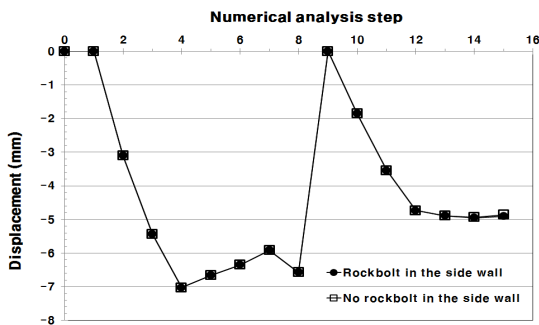
Fig. 6(a), (b) 및 (c)에서 x축은 Table 4에서 보여준 각 해석단계이며 y축은 각 해석단계에서 계산된 천단침하, 상반 내공변위 및 하반 내공변위를 보여주고 있다. 0단계에서 8단계까지는 기존 3차선 NATM 도로터널 건설에 의해 발생하는 변위를 보여주고 있다. 천단침하량은 최대 7 mm, 상반 내공변위는 9 mm, 하반 내공변위는 8.5 mm를 나타내고 있다. 계산된 천단침하량, 상반 내공변위 및 하반 내공변위는 허용치(20 mm)내에 존재하므로 터널의 안정성이 확보되었다고 판단된다. 이미 기존 3차선 NATM 도로터널이 건설되어 운영되고 있으므로 8단계에 발생한 변위는 9단계에서 초기화하였다.

기존 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM 도로터널로 확대 시공하는 10단계부터 15단계까지는 터널 양쪽 측벽하부의 록볼트 시공 유·무에 따라 추가 발생하는 변위를 예측하고 비교하였다. 천단침하량(Fig. 6(a))은 양쪽 측벽하부의 록볼트 시공 유·무에 따라 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, 최대 5.2 mm의 천단침하량을 보여주고 있다. 상반 내공변위(Fig. 6(b))도 양쪽 측벽하부의 록볼트 시공 유·무에 따라 거의 차이가 없었으며, 최대 상반 내공변위는 4 mm정도를 보여주고 있다. 이러한 수치해석 결과로부터 터널의 천단변위와 상반 내공변위는 터널 측벽하부에 시공되는 록볼트의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

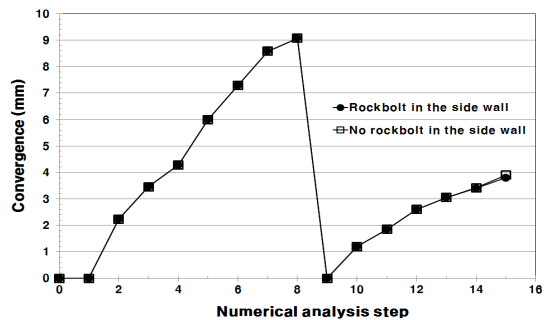
하반 내공변위(Fig. 6(c))는 13단계(4차선 터널 하부 굴착)까지는 터널 측벽하부의 록볼트 시공 유·무에 상관없이 동일하였으나, 14단계(4차선 터널 하부 연성 슛크리트) 및 15단계(4차선 터널 하부 강성 슛크리트)에서 터널 양쪽 측벽하부에 록볼트를 시공하지 않은 경우가 록볼트를 시공한 경우보다 최대 0.57 mm 크게 나타났다. 이것은 터널 하반을 굴착하고 터널 양쪽 측벽하부에 록볼트를 시공하지 않아서 변위가 더 발생된 것으로 판단된다. 터널 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않은 경우에 최대 하반 내공변위는 5 mm보다 작게 나타났다.

기존 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM 도로터널로 확대하기 위하여 3차선 NATM 도로터널의 콘크리트 라이닝을 제거하고 터널 상부를 굴착하는 과정이 터널 안정성을 저해하는 가장 큰 단계라 할 수 있다. 이 과정을 모사한 해석단계 10단계에서 계산된 천단변위, 상반 내공변위 및 하반 내공변위는 각각 1.9 mm, 1.3 mm 및 0.95 mm로 허용침하량(20 mm)보다 아주 낮게 나타났다. 이것은 기존 터널 구조물의 콘크리트 라이닝 해체 및 확대를 위한 상반 굴착시 굴착된 지반이 붕괴되지 않을 가능성이 높다는 것을 보여주고 있다.

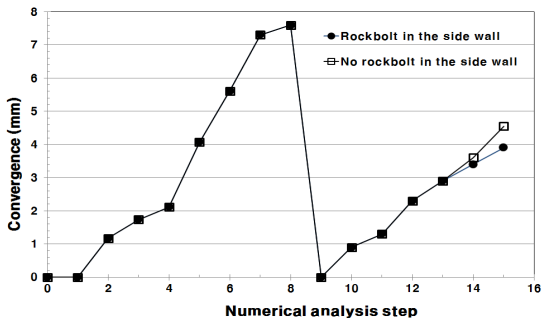
Fig. 6(d)는 두께 25 cm의 쏘크리트가 적용된 4차선 NATM 도로터널의 측벽하부에서 록볼트 시공 유·무에 따라 발생된 터널 전단면의 쏘크리트 응력을 보여주고 있다. 쏘크리트 응력은 Table 4의 15단계에서 계산된 것이다. Fig. 6(d)에서 x축은 수치해석을 위해 작성된 해석단면에서 쏘크리트의 부재번호를 나타내고 있다(Fig. 5 참조). 쏘크리트 부재번호는 터널단면 좌측하단에서 1로 시작하여 우측하단에서 50으로 끝난다. 부재번호 1~5까지는 4차선 NATM 도로터널에서 좌측 측벽하부의 록볼트 시공 유·무에 해당하는 부분이고, 부재번호 46~50까지는 우측 측벽하부에서 록볼트 시공 유·무에 해당하는 부분이다. 터널 양쪽 측벽하부에서 록볼트 시공 유·무에 따라



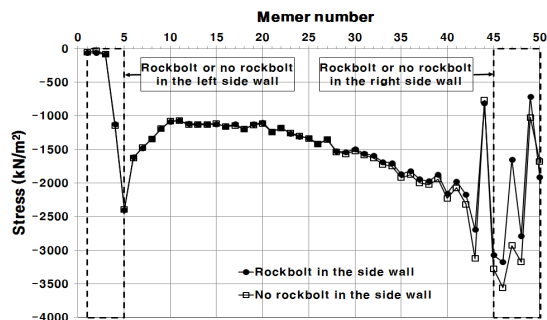
(a) Vertical displacement at the center of tunnel



(b) Convergence of crown



(c) Convergence of bench/invert



(d) Stress in shotcrete lining

Fig. 6. Vertical displacement, convergence and stress in shotcrete lining.

발생된 슛크리트 응력을 검토한 결과, 천단 아치부 및 터널 우측 측벽 상하부에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 이것은 Fig. 5에서 보여주듯이 터널 좌측 측벽에서 추가적인 굴착이 발생하지 않아 슛크리트의 응력에 차이가 없는 것으로 판단되어 진다.

그러나, 4차선 NATM 도로터널 건설을 위하여 기존 3차선 NATM 도로터널의 우측을 굴착한 후, 4차선 NATM 도로터널의 우측 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않은 경우(부재번호 46~50)의 슛크리트 응력은 록볼트를 시공한 경우의 슛크리트 응력보다 최대 1300 kN/m^2 크게 나타났다(부재번호 47). 부재번호 47은 터널 우측하부에서 굴착 바닥면으로부터 세 번째로 시공된 록볼트가 위치한 곳이다. 록볼트를 시공하지 않은 경우의 슛크리트에 최대 3600 kN/m^2 의 휨 압축응력이 발생하였고(부재번호 46), 록볼트를 시공한 경우의 슛크리트에 최대 3200 kN/m^2 의 휨 압축응력이 발생하였다(부재번호 46). 또한, 터널 상부와 우측 측벽상부(부재번호 29~43)에서도 우측 측벽하부의 록볼트 시공 유·무에 의한 영향으로 슛크리트 응력차이를 나타내고 있다. 이러한 현상은 터널 상부와 우측 측벽상부의 슛크리트가 터널 우측 측벽하부의 록볼트 미시공에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다.

3.2 록볼트 미시공부 슛크리트 보강에 따른 터널거동

앞에서 서술한 바와 같이 4차선 NATM 도로터널 양쪽 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않은 경우의 하반 내공변위와 슛크리트 응력이 록볼트를 시공한 경우보다 다소 증가하는 것으로 나타났다. 터널 양쪽 측벽하부에서 록볼트를 시공되지 않아 증가된 하반 내공변위와 슛크리트 응력을 감소시키기 위하여 터널 양쪽 측벽하부의 슛크리트 두께를 증가시킨 후 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 기본 슛크리트 두께(25 cm)의 20%(5 cm), 40%(10 cm) 및 100%(25 cm)에 해당하는 슛크리트 두께를 기본 슛크리트 두께에 추가로 보강한 3가지 경우에 대하여 수행하였다. 3가지 경우에서 계산된 변위와 응력들은 두께 25 cm인 기본 슛크리트에 록볼트를 시공한 경우와 시공하지 않은 경우에서 계산된 변위와 응력들과 비교분석되었다.

Fig. 7은 4차선 NATM 도로터널 양쪽 측벽하부에서 두께 25cm인 슛크리트에 록볼트를 시공한 경우, 두께 25 cm인 슛크리트에 록볼트를 시공하지 않은 경우, 기본 슛크리트 두께 25 cm의 20%(5 cm), 40%(10 cm) 및 100%(25 cm)에 해당하는 슛크리트 두께를 추가로 보강한 경우에 대하여 Table 4에서 언급한 13단계(4차선 터널 하부 굴착), 14단계(4차선 터널 하부 연성스�크리트), 및 15단계(4차선 터널 하부 강성스�크리트)에서 계산된 하반 내공변위를 보여주고 있다.

5가지의 경우의 하반 내공변위를 비교한 결과, 하반 내공변위는 터널 측벽하부에 록볼트를 시공하지 않고 슛크리트 두께를 증가 시킬수록, 록볼트를 시공한 경우의 하반 내공변위에 근접하는

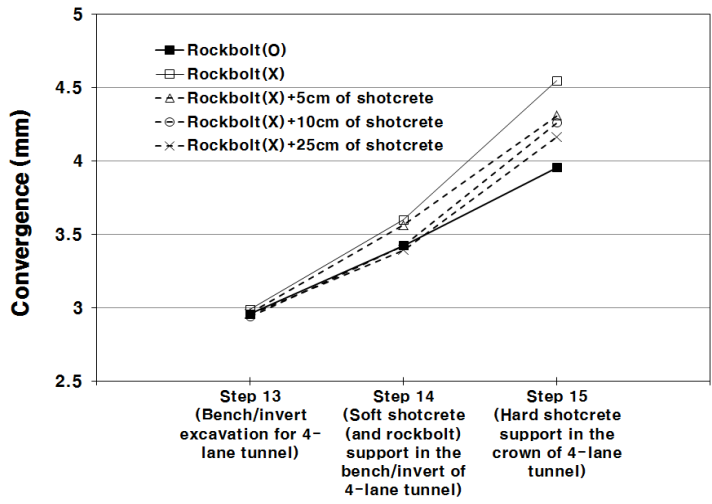


Fig. 7. Convergence of bench/unvert at 13, 14 and 15 steps.

경향을 보이고 있다. 그러나, 수치해석 15단계(4차선 터널 하부 강성샷크리트)에서 터널 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않고 샷크리트 두께를 30 cm, 35 cm 및 50 cm로 증가시킨 경우의 하반 내공변위는 두께 25 cm의 샷크리트만 시공한 경우의 하반 내공변위를 각각 0.24 mm, 0.29 mm 및 0.38 mm 정도 감소시키는 것으로 나타났다. 이러한 3가지 경우에 감소된 하반 내공변위들은 록볼트 시공 유·무에 따라 발생된 하반 내공변위의 차이(0.59 mm)를 각각 40%, 48% 및 65% 정도 감소시켰지만 측벽하부의 샷크리트 두께증가에 비해 하반 내공변위는 매우 미미하게 감소하는 것으로 나타났다.

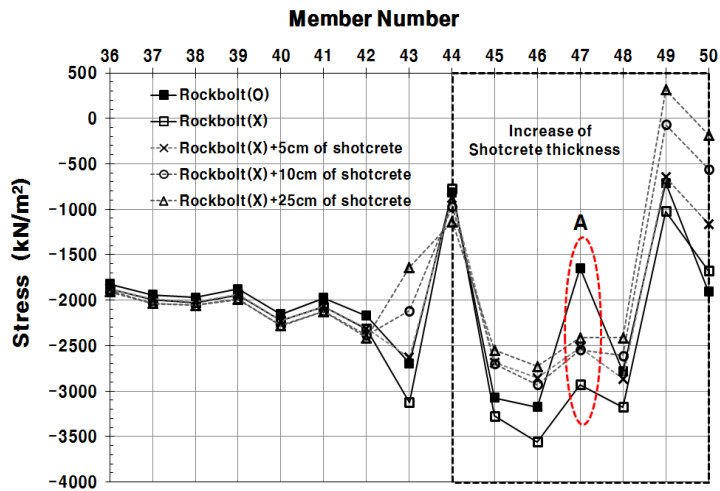


Fig. 8. Stress in shotcrete lining on the right side of 4-lane NATM tunnel.

터널내의 하반 내공변위 비교만으로는 최적의 보강 슛크리트 두께를 결정할 수 없으므로 5가지 경우의 부재별 슛크리트 응력들을 비교하였다. Fig. 8은 단면 확대된 4차선 NATM 도로터널의 우측에서 5가지 경우에 대하여 계산된 슛크리트 응력들을 보여주고 있다. Fig. 8에서 보여주는 슛크리트 응력들은 Table 4에서 언급한 15단계(4차선 터널 하부 강성스�크리트)에서 계산된 결과들이다.

터널 우측 측벽하부에서 슛크리트 두께가 증가된 구간(부재번호 44~50)에서 특이구간인 “A” 지점(부재번호 47) 을 제외하고는 슛크리트 두께가 증가할수록 슛크리트 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 슛크리트 두께를 증가시킨 3가지 경우의 슛크리트 응력들은 록볼트를 시공한 경우의 슛크리트 응력보다 작게 나타났다. 이러한 결과는 록볼트 미시공에 의한 추가적으로 발생하는 슛크리트 응력을 슛크리트 두께증가로 감소시킬 수 있다는 것이다. Fig. 8에서 “A” 지점은 상·하 분할 굴착 경계부로 터널 우측 측벽하부에서 록볼트를 시공한 경우의 슛크리트 응력이 록볼트 시공으로 슛크리트 응력이 낮게 나타났다. 터널 우측 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않은 경우에는 록볼트 미시공으로 슛크리트 응력이 상대적으로 크게 발생하였다. 또한, 터널 측벽하부에서 슛크리트 두께가 증가할수록 슛크리트 두께가 증가하지 않는 구간(부재번호 42~44)에서도 슛크리트 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 Fig. 9에서 보여주듯이 실제 시공조건은 슛크리트 두께가 점증적으로 증가하는 반면, 해석적 검토시 검토영역에서 두께변화를 고려한 단면변화부(taper) (부재번호 42~44)를 고려하지 않아 강성차이에 의한 응력전이가 발생한 것으로 판단된다. 그러나, 단면변화에 의한 강성차이로 응력역전이 발생하지만 그 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 부재번호 44에서 슛크리트 응력이 급격히 감소하는 것은 Fig. 9에서 보여주듯이 해석적 검토시 단면이 급격하게 변화하여 발생한 현상으로 판단된다.

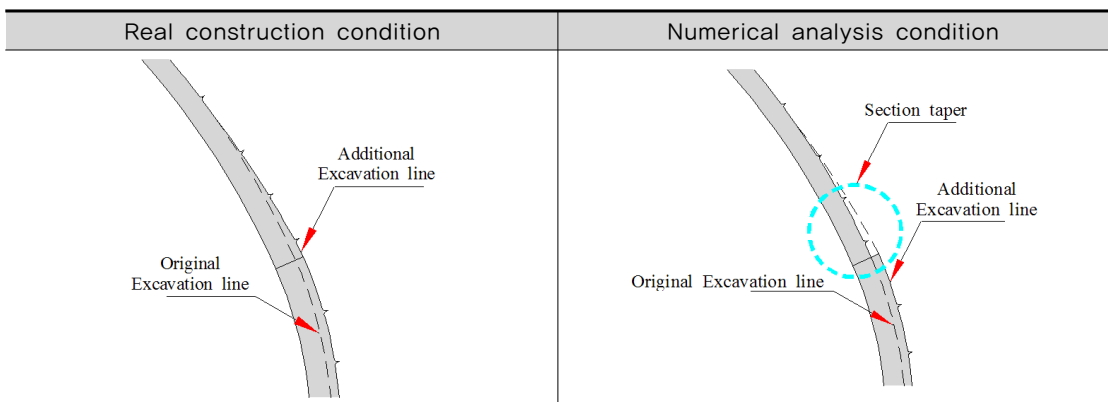


Fig. 9. Real construction condition vs. Numerical analysis condition.

췁크리트 두께 변화에 따른 췁크리트 응력변화를 정량화하기 위하여 록볼트를 시공하지 않은 4가지 경우의 췁크리트 응력을 록볼트를 시공한 경우의 췁크리트 응력으로 나누어 주었다(Fig. 10). y축의 값 1은 록볼트를 시공한 경우의 췁크리트 응력과 동일하다는 것을 의미한다.

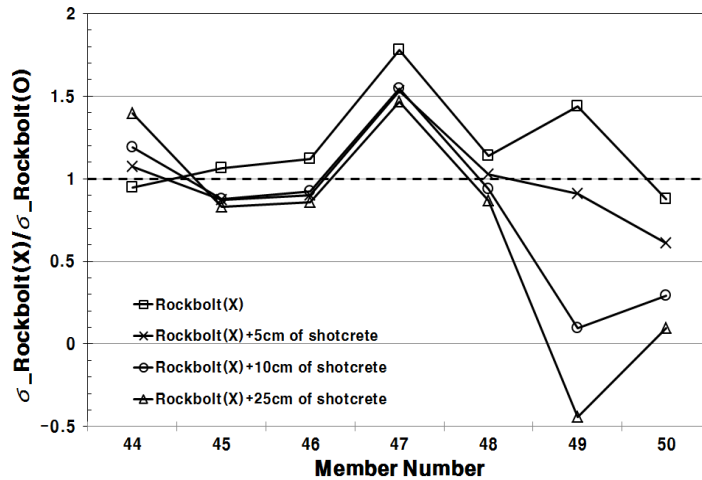


Fig. 10. Normalized stress in shotcrete lining.

부재번호 47를 제외한 부재번호 44에서 48사이에서 기본 췁크리트 두께(25 cm)의 20%(췁크리트 두께 5 cm 추가) 및 40%(췁크리트 두께 10 cm 추가)에 해당하는 췁크리트 두께를 기존 췁크리트 두께에 추가하여 췁크리트 두께들을 증가시킨 경우의 췁크리트 응력들이 두께 25 cm의 췁크리트와 록볼트를 시공한 경우의 췁크리트 응력들과 가장 유사하였다. 부재번호 49에서 50에서는 기본 췁크리트 두께(25 cm)의 20%(췁크리트 두께 5 cm 추가)에 해당하는 두께를 기본 췁크리트 두께에 추가하여 췁크리트 두께(30 cm)를 증가시킨 경우의 췁크리트 응력들이 두께 25 cm의 췁크리트와 록볼트를 시공한 경우의 췁크리트 응력들과 가장 작은 차이를 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 췁크리트 두께를 20%(췁크리트 두께 50 mm 추가)만 증가시켜도 록볼트 미시공에 의해 발생하는 추가 췁크리트 응력을 충분히 분담할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM 도로터널로 단면 확대시, 공사중인 터널내의 교통흐름을 유지하기 하기 위하여 프로젝터를 공사중인 터널내에 설치하는 경우가 있다.

설치된 프로텍터 외부와 확대된 4차선 NATM 도로터널 측벽 굴착면사이가 협소하여 록볼트 시공을 위한 천공 및 록볼트 시공이 불가능할 수 가 있다. 이러한 협소공간인 터널 측벽하부에서 록볼트 시공 대신 슛크리트만으로 보강하는 경우에 확대된 터널구조물의 안정성을 분석하였고 보강되는 최적의 슛크리트 두께를 제시하였다.

1. 4차선 NATM 도로터널로 확대 시공할 경우, 천단침하량, 상반 내공변위 및 하반 내공변위는 각각 5.2 mm, 4 mm 및 4.6 m로 나타났다. 이러한 침하량과 내공변위는 허용치(20 mm)내에 존재하였으므로 터널의 안정성이 확보되었다. 또한, 터널 측벽하부에서 록볼트 시공 유·무에 따라 터널의 천단변위와 상반 내공변위 차이는 없으므로 터널 측벽하부에서 시공되는 록볼트는 터널의 천단변위와 상반 내공변위에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.
2. 기존 3차선 NATM 도로터널을 4차선 NATM 도로터널로 확대하기 위하여 3차선 NATM 도로터널의 콘크리트 라이닝을 제거하고 터널 상부를 굴착하는 단계에서 천단변위, 상반 내공변위 및 하반 내공변위는 각각 1.9 mm, 1.3 mm 및 0.95 mm로 허용침하량(20 mm)보다 아주 낮게 나타났다. 이것은 기존 터널 구조물의 콘크리트 라이닝 해체 및 확대를 위한 상반 굴착시 본 연구에서 적용된 지반물성치를 가지고 있는 지반이 굴착이 된 후에도 붕괴될 가능성이 희박하다는 것을 보여주고 있다.
3. 두께 25 cm의 슛크리트가 터널 전단면에 시공된 확대된 4차선 NATM 도로터널의 측벽하부에서 록볼트 시공 유·무에 따라 터널내 천단변위 및 상반 내공변위는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 하반 내공변위는 터널 양쪽 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않은 경우가 록볼트를 시공한 경우보다 최대 0.59 mm 크게 나타났다. 터널 측벽하부에서 록볼트를 시공하지 않은 경우의 슛크리트 응력은 록볼트를 시공한 경우의 슛크리트 응력보다 최대 $1,300 \text{ kN/m}^2$ 크게 나타났다.
4. 증가된 하반 내공변위 및 슛크리트 응력을 저감시키기 위해 기본 슛크리트 두께(25 cm)의 20%(5 cm), 40%(10 cm) 및 100%(25 cm)에 해당하는 슛크리트 두께를 추가로 보강한 결과, 두께 25 cm의 슛크리트 하반 내공변위를 각각 0.24 mm, 0.29 mm 및 0.38 mm 정도로 매우 미미하게 감소시켰다. 또한, 록볼트를 시공하지 않는 측벽하부에서 기존 슛크리트 두께 25 cm의 20%(5 cm)만 증가시킨(25 cm→30 cm) 경우의 슛크리트 응력은 터널 측벽하부에서 두께 25 cm의 슛크리트와 록볼트를 시공한 경우의 슛크리트 응력과 유사한 경향을 보여주고 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업의 “교통류 보존형 터널단면 확대 시공기술 개발” 연구비 지원(09기술혁신E01)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Beak, K.H., Roh, J.R. (2007), “Case Study on the Widening Construction of Tunnel Under Use”, 33th Korean Society of Civil Engineers Annual Convention & Civil Expo, pp. 2935-2938.
2. Kim, D.G., Jung, H.S. (2007), “Improvement of tunnel performance by cross s section enlargement of existing tunnel”, Korean Geotechnical Society Magazine, Vol. 23, No. 3, pp. 14-20.
3. Kim, W.K., Jin, B.M., Baek, K.H., Seo, K.W. (2011), “The effect of material behavior of blasted muck on the impact force applied on a protector”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association , Vol. 13, No. 3, pp. 261-275.
4. Seo, K.W., Beak, K.H., Kim, W.K. (2008), “Case Study on Enlargement of Existing Tunnel in Foreign Countries(I)”, Korean Tunnelling Association Magazine, Vol. 10, No.1, pp. 40-50.
5. Seo, K.W., Beak, K.H., Kim, W.K. (2008), “Case Study on Enlargement of Existing Tunnel in Foreign Countries(II)”, Korean Tunnelling Association Magazine, Vol. 10, No. 2, pp. 71-79.
6. Seo, K.W., Kim, W.K., Baek, K.H., Kim, J.W. (2010), “A comparative analysis of prediction and measurement for reinforcement effect of face bolts”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 12, No. 5, pp. 359-368.